Física

para la ciencia y la tecnología

6ª edición

Tipler | Mosca

Volumen 2A

Electricidad y magnetismo

EDITORIAL REVERTÉ

Abreviaturas de unidades

A	ampère	H	henry	nm	nanómetro (10^{-9} m)
Å	ángstrom (10^{-10} m)	h	hora	pt	pinta
atm	atmósfera	Hz	hertz	qt	quart
Btu	unidad térmica inglesa	in	pulgada	rev	revolución
Bq	becquerel	J	joule	R	roentgen
C	coulomb	K	kelvin	Sv	sievert
°C	grados centígrados	kg	kilogramo	s	segundo
cal	caloría	km	kilómetro	T	tesla
Ci	curie	keV	kilo-electronvolt	u	unidad de masa unificada
cm	centímetro	lb	libra	V	volt
dyn	dina	L	litro	W	watt
eV	electronvolt	m	metro	Wb	weber
°F	grados Fahrenheit	MeV	mega-electronvolt	y	año
fm	femtometro, fermi (10^{-15} m)	Mm	megametro (10^{6} m)	yd	yarda
ft	pie	mi	milla	μm	micrometro (10^{-6} m)
Gm	gigametro (10^{9} m)	min	minuto	μs	microsegundo
G	gauss	mm	milímetro	μC	microcoulomb
Gy	gray	ms	milisegundo	Ω	ohm
g	gramo	N	newton		

Factores de conversión

Longitud

1 m = 39,37 in = 3,281 ft = 1,094 yd

1 m = 10^{15} fm = 10^{10} Å = 10^{9} nm

1 km = 0,6214 mi

1 mi = 5280 ft = 1,609 km

1 año-luz= 1 $c \cdot$ a = $9{,}461 \times 10^{15}$ m

1 in = 2,540 cm

Volumen

1 L = 10^{3} cm^3 = 10^{-3} m^3 = 1,057 qt

Tiempo

1 h = 3600 s = 3,6 ks

1 a = 365,24 d = $3{,}156 \times 10^{7}$ s

Velocidad

1 km/h = 0,278 m/s = 0,6214 mi/h

1 ft/s = 0,3048 m/s = 0,6818 mi/h

Ángulo y velocidad angular

1 rev = 2π rad = 360°

1 rad = 57,30°

1 rev/min = 0,1047 rad/s

Fuerza–presión

1 N = 10^{5} dina = 0,2248 lb

1 lb = 4,448 N

1 atm = 101,3 kPa = 1,013 bar = 76,00 cmHg = 14,70 lb/in^2

Masa

1 u = $[(10^{-3}\ \text{mol}^{-1})/N_A]$ kg = $1{,}661 \times 10^{-27}$ kg

1 tonelada = 10^{3} kg = 1 Mg

1 slug = 14,59 kg

1 kg ≈ 2,205 lb

Energía–Potencia

1 J = 10^{7} erg = 0,7376 ft · lb = $9{,}869 \times 10^{-3}$ atm · L

1 kW · h = 3,6 MJ

1 cal = 4,184 J = $4{,}129 \times 10^{-2}$ atm · L

1 atm · L = 101,325 J = 24,22 cal

1 eV = $1{,}602 \times 10^{-19}$ J

1 Btu = 778 ft · lb = 252 cal = 1054 J

1 caballo de vapor = 550 ft · lb/s = 746 W

Conductividad térmica

1 W/(m · K) = 6,938 Btu · in/(h · ft^2 · °F)

Campo magnético

1 T = 10^{4} G

Viscosidad

1 Pa · s = 10 poise

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

VOLUMEN 2A

Electricidad y magnetismo

SEXTA EDICIÓN

FÍSICA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

VOLUMEN 2A
Electricidad y magnetismo

Paul A. Tipler
Gene Mosca

EDITORIAL REVERTÉ

Barcelona • Bogotá • Buenos Aires • México

Título de la obra original:

Physics for Scientists and Engineers, Sixth Edition.

Edición original en lengua inglesa publicada por

W. H. FREEMAN AND COMPANY, New York and Basingstoke
41 Madison Avenue, New York (NY) – U.S.A.

Copyright © 2008 by W. H. Freeman and Company. All Rights Reserved

Edición en español:

© Editorial Reverté, S. A., 2010, 2012, 2015, 2019, 2020

Edición en papel
© Editorial Reverté, S. A., 2010, 2012, 2015, 2019, 2020
ISBN: 978-84-291-4424-6 Volumen 2A
ISBN: 978-84-291-4428-4 Obra completa

Edición e-book (PDF)
© Editorial Reverté, S. A., 2021
ISBN: 978-84-291-9601-6

Versión española:

COORDINADOR Y TRADUCTOR

Dr. José Casas-Vázquez
Catedrático de Física de la Materia Condensada

TRADUCTORES

Dr. Albert Bramon Planas
Catedrático de Física Teórica

Dr. Josep Enric Llebot Rabagliati
Catedrático de Física de la Materia Condensada

Dr. Fernando M. López Aguilar
Catedrático de Física Aplicada

Dr. Vicenç Méndez López
Profesor Agregado de Física de la Materia Condensada

Departamento de Física
Universidad Autónoma de Barcelona
España

MAQUETACIÓN: REVERTÉ-AGUILAR
CORRECCIÓN DE ESTILO: CARLOS CISTUÉ SOLÁ

Propiedad de:

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.
Loreto, 13-15. Local B
Tel: (34) 93 419 33 36
08029 Barcelona. ESPAÑA
reverte@reverte.com

www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

1343

PT: Para Claudia

GM: Para Vivian

Índice abreviado de la obra completa

VOLUMEN 1

Volumen 1A

Thinkstock/Alamy

PARTE I MECÁNICA

1 Medida y vectores / 1
2 El movimiento en una dimensión / 27
3 Movimiento en dos y tres dimensiones / 63
4 Leyes de Newton / 93
5 Aplicaciones adicionales de las leyes de Newton / 127
6 Trabajo y energía cinética / 173
7 Conservación de la energía / 201
8 Conservación del momento lineal / 247
9 Rotación / 289
10 Momento angular / 331
11 Gravedad / 363
12 Equilibrio estático y elasticidad / 397
13 Fluidos / 423

Volumen 1B

PARTE II OSCILACIONES Y ONDAS

14 Oscilaciones / 457
15 Movimiento ondulatorio / 495
16 Superposición y ondas estacionarias / 533

Volumen 1C

PARTE III TERMODINÁMICA

17 Temperatura y teoría cinética de los gases / 563
18 Calor y primer principio de la termodinámica / 591
19 Segundo principio de la termodinámica / 629
20 Propiedades y procesos térmicos / 665
R Relatividad especial / R.1

VOLUMEN 2

Volumen 2A

PARTE IV ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

21 Campo eléctrico I: distribuciones discretas de carga / 693
22 Campo eléctrico II: distribuciones continuas de carga / 727
23 Potencial eléctrico / 763
24 Capacidad / 801
25 Corriente eléctrica y circuitos de corriente continua / 839
26 El campo magnético / 887
27 Fuentes del campo magnético / 917
28 Inducción magnética / 959
29 Circuitos de corriente alterna / 995
30 Ecuaciones de Maxwell y ondas electromagnéticas / 1029

Volumen 2B

PARTE V LUZ

31 Propiedades de la luz / 1055
32 Imágenes ópticas / 1097
33 Interferencia y difracción / 1141

FÍSICA MODERNA

R Relatividad especial / R.1

PARTE VI MECÁNICA CUÁNTICA, RELATIVIDAD Y ESTRUCTURA DE LA MATERIA

34 Dualidad onda-partícula y física cuántica / 1173
35 Aplicaciones de la ecuación de Schrödinger / 1203
36 Átomos / 1227
37 Moléculas / 1261
38 Sólidos / 1281
39 Relatividad / 1319
40 Física nuclear / 1357
41 Las partículas elementales y el origen del universo / 1389

APÉNDICES Y RESPUESTAS

Apéndice A Unidades SI y factores de conversión / AP.1
Apéndice B Datos numéricos / AP.3
Apéndice C Tabla periódica de los elementos / AP.6
Apéndice de matemáticas / M.1
Respuestas de los problemas impares del final de los capítulos / A.1

Índice analítico

Volumen 2A

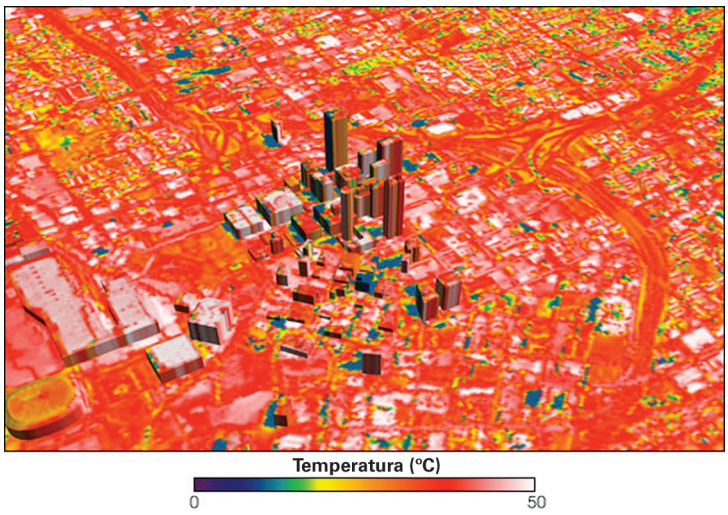
Prefacio xiii
Acerca de los autores xxii

* Materias opcionales

PARTE IV ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

Capítulo 21
CAMPO ELÉCTRICO I: DISTRIBUCIONES DISCRETAS DE CARGA / 693

21.1 Carga eléctrica 694
21.2 Conductores y aislantes 697



NASA/Goddard Space Flight Center Scientific Visualization Studio

21.3 Ley de Coulomb 699
21.4 El campo eléctrico 704
21.5 Líneas de campo eléctrico 711
21.6 Acción del campo eléctrico sobre las cargas 714

Temas de actualidad en Física:

Recubrimiento industrial con polvo electrostático / 719

Resumen 720
Problemas 721

Capítulo 22
CAMPO ELÉCTRICO II: DISTRIBUCIONES CONTINUAS DE CARGA / 727

22.1 Cálculo del campo eléctrico $\vec{E}$ mediante la ley de Coulomb 728
22.2 Ley de Gauss 738
22.3 Cálculo del campo eléctrico $\vec{E}$ con la ley de Gauss utilizando la simetría 742
22.4 Discontinuidad de E_n 749
22.5 Carga y campo en la superficie de los conductores 750
*22.6 Equivalencia de la ley de Gauss y la ley de Coulomb en Electrostática 753

Temas de actualidad en Física:

Distribución de carga—caliente y frío / 754

Resumen 755
Problemas 756

Capítulo 23
POTENCIAL ELÉCTRICO / 763

23.1 Diferencia de potencial 764
23.2 Potencial debido a un sistema de cargas puntuales 767
23.3 Determinación del campo eléctrico a partir del potencial 772
23.4 Cálculo de *V* para distribuciones continuas de carga 773
23.5 Superficies equipotenciales 781
23.6 Energía potencial electrostática 787

Temas de actualidad en Física:

Relámpagos—Campos de atracción / 791

Resumen 792
Problemas 794

Capítulo 24
CAPACIDAD / 801

24.1 Capacidad 802
24.2 Almacenamiento de la energía eléctrica 806
24.3 Condensadores, baterías y circuitos 810
24.4 Dieléctricos 817
24.5 Estructura molecular de un dieléctrico 824

Temas de actualidad en Física:

Cambios en Condensadores—Carga directa / 828

Resumen 829
Problemas 831

Capítulo 25
CORRIENTE ELÉCTRICA Y CIRCUITOS DE CORRIENTE CONTINUA / 839

25.1 Corriente y movimiento de cargas 840
25.2 Resistencia y ley de Ohm 844
25.3 La energía en los circuitos eléctricos 849
25.4 Asociaciones de resistencias 854
25.5 Reglas de Kirchhoff 860
25.6 Circuitos *RC* 868

Temas de actualidad en Física:

Sistemas eléctricos de los automóviles: innovación en la conducción / 874

Resumen 875
Problemas 877

Capítulo 26
EL CAMPO MAGNÉTICO / 887

26.1 Fuerza ejercida por un campo magnético 888
26.2 Movimiento de una carga puntual en un campo magnético 892
26.3 Momentos de fuerza sobre espiras de corriente e imanes 900
26.4 Efecto Hall 904

Temas de actualidad en Física:

Cambios en los magnetismos de la Tierra y el Sol / 908

Resumen 909
Problemas 910

Capítulo 27
FUENTES DEL CAMPO MAGNÉTICO / 917

27.1 Campo magnético creado por cargas puntuales en movimiento 918
27.2 Campo magnético creado por corrientes eléctricas: ley de Biot y Savart 919
27.3 Ley de Gauss para el magnetismo 932
27.4 Ley de Ampère 933
27.5 El magnetismo en la materia 937

Temas de actualidad en Física:

Aplicaciones del solenoide / 947

Resumen 948
Problemas 950

Capítulo 28
INDUCCIÓN MAGNÉTICA / 959

28.1 Flujo magnético 960
28.2 Fem inducida y ley de Faraday 961
28.3 Ley de Lenz 965
28.4 Fem de movimiento 969
28.5 Corrientes de Foucault o turbillonarias 974
28.6 Inductancia 974
28.7 Energía magnética 977
*28.8 Circuitos *RL* 979
*28.9 Propiedades magnéticas de los superconductores 983

Temas de actualidad en Física:

La promesa de los superconductores / 985

Resumen 986
Problemas 988

Capítulo 29

CIRCUITOS DE CORRIENTE ALTERNA / 995

29.1 Corriente alterna en una resistencia 996
29.2 Circuitos de corriente alterna 999
*29.3 El transformador 1004
*29.4 Circuitos *LC* y *LCR* sin generador 1007
*29.5 Fasores 1010
*29.6 Circuitos *LCR* con generador 1011

Temas de actualidad en Física:

La red eléctrica: energía para el público en general / 1019

Resumen 1020
Problemas 1022

Capítulo 30

ECUACIONES DE MAXWELL Y ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS / 1029

30.1 Corriente de desplazamiento de Maxwell 1030
30.2 Ecuaciones de Maxwell 1033
30.3 La ecuación de ondas para las ondas electromagnéticas 1034
30.4 Radiación electromagnética 1040

Temas de actualidad en Física:

Comunicación inalámbrica: espacio electromagnético compartido / 1049

Resumen 1050
Problemas 1051

RESPUESTAS DE LOS PROBLEMAS IMPARES DEL FINAL DE LOS CAPÍTULOS / A.1

ÍNDICE ALFABÉTICO / I.1

Prefacio

La sexta edición de *Física para la ciencia y la tecnología* presenta un texto y herramientas *online* completamente integrados que ayudarán a los estudiantes a aprender de un modo más eficaz y que permitirá a los profesores adaptar sus clases para enseñar de un modo más eficiente.

El texto incluye un nuevo enfoque estratégico de resolución de problemas, un apéndice de matemáticas integrado y nuevas herramientas para mejorar la comprensión conceptual. Los nuevos temas de actualidad en física destacan temas innovadores que ayudan a los estudiantes a relacionar lo que aprenden con las tecnologías del mundo real.

CARACTERÍSTICAS CLAVE

ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

En la sexta edición destaca una nueva estrategia de resolución de problemas en la que los Ejemplos siguen un formato sistemático de **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación**. Este formato conduce a los estudiantes a través de los pasos implicados en el análisis del problema, la resolución del problema y la comprobación de sus respuestas. Los Ejemplos a menudo incluyen útiles secciones de **Observación** que presentan formas alternativas de resolución de problemas, hechos interesantes, o información adicional relativa a los conceptos presentados. Siempre que se considera necesario, los Ejemplos van seguidos de **Problemas Prácticos** para que los estudiantes puedan evaluar su dominio de los conceptos.

En esta edición, las etapas de resolución de problemas siguen contando con las ecuaciones necesarias al lado, de manera que a los estudiantes les resulte más fácil seguir el razonamiento.

Después de cada enunciado del problema, los estudiantes van al **Planteamiento** del problema. Aquí, el problema se analiza tanto conceptualmente como visualmente.

En la sección **Solución**, cada paso de la solución se presenta con un enunciado escrito en la columna de la izquierda y las ecuaciones matemáticas correspondientes en la columna de la derecha.

La **Comprobación** recuerda a los estudiantes que han de verificar que sus resultados son precisos y razonables.

La **Observación** sugiere una forma distinta de enfocar un ejemplo o da información adicional relevante para el ejemplo.

A la solución le sigue normalmente un **Problema Práctico**, lo que permite a los estudiantes comprobar su comprensión. Al final del capítulo se incluyen las respuestas para facilitar una comprobación inmediata.

Ejemplo 3.4 **Tomando una curva**

Un coche se mueve hacia el este a 60 km/h. Toma una curva y 5 s más tarde viaja hacia el norte a 60 km/h. Determinar la aceleración media del coche.

PLANTEAMIENTO Calculamos la aceleración media a partir de su definición, $\vec{a}_m = \Delta\vec{v}/\Delta t$. Primero calculamos $\Delta\vec{v}$ que es el vector que sumado a $\vec{v}_i$ nos da $\vec{v}_f$.

SOLUCIÓN

1. La aceleración media es el cociente entre la variación de velocidad y el intervalo de tiempo: $\vec{a}_m = \dfrac{\Delta\vec{v}}{\Delta t}$
2. Para hallar $\Delta\vec{v}$, debemos especificar primero $\vec{v}_i$ y $\vec{v}_f$. Dibujemos $\vec{v}_i$ y $\vec{v}_f$ (figura 3.7*a*), y tracemos el diagrama de suma vectorial (figura 3.7*b*) correspondiente a $\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$:
3. El cambio de velocidad viene determinado por las velocidades inicial y final: $\vec{v}_f = \vec{v}_i + \Delta\vec{v}$
4. Sustituya los resultados anteriores para determinar la aceleración media: $\vec{a}_m = \dfrac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \dfrac{60\ \text{km/h}\ \hat{j} - 60\ \text{km/h}\ \hat{i}}{5{,}0\ \text{s}}$
5. Convierta 60 km/h a metros por segundo: $60\ \text{km/h} \times \dfrac{1\ \text{h}}{3600\ \text{s}} \times \dfrac{1000\ \text{m}}{1\ \text{km}} = 16{,}7\ \text{m/s}$
6. Exprese la aceleración en metros por segundo al cuadrado: $\vec{a}_m = \dfrac{\vec{v}_f - \vec{v}_i}{\Delta t} = \dfrac{16{,}7\ \text{m/s}\ \hat{j} - 16{,}7\ \text{m/s}\ \hat{i}}{5{,}0\ \text{s}} = \boxed{-3{,}4\ \text{m/s}^2\,\hat{i} + 3{,}4\ \text{m/s}^2\,\hat{j}}$

COMPROBACIÓN La componente de la velocidad en dirección este disminuye de 60 km/h a cero, de tal forma que cabría esperar que la componente x de la aceleración fuese negativa. Así mismo, la componente de la velocidad en dirección norte aumenta de cero a 60 km/h, de forma que cabría esperar que la componente y de la aceleración fuese positiva. El resultado del apartado 6 concuerda con estas expectativas.

OBSERVACIÓN Obsérvese que el coche sigue acelerando aunque el módulo de su velocidad se mantenga constante.

PROBLEMA PRÁCTICO 3.1 Determinar el módulo y la dirección del vector aceleración media.

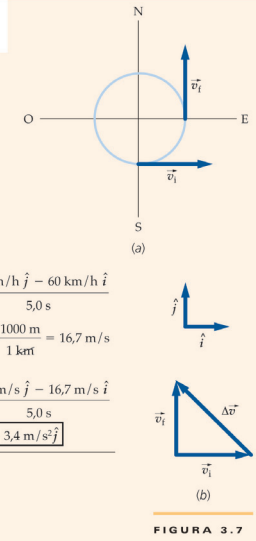


FIGURA 3.7

En casi todos los capítulos se incluye un recuadro llamado **Estrategia de resolución de problemas** para reforzar el formato **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación** para solucionar satisfactoriamente los problemas.

ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Velocidad relativa

PLANTEAMIENTO El primer paso para la resolución de problemas de velocidad relativa es identificar y marcar los sistemas de referencia relevantes. Aquí les llamaremos sistema de referencia A y B.

SOLUCIÓN

1. Utilizando $\vec{v}_{pB} = \vec{v}_{pA} + \vec{v}_{AB}$ (ecuación 3.9), relacione la velocidad del objeto móvil (partícula p) relativa al sistema A con la velocidad de la partícula relativa al sistema B.
2. Trace un diagrama de suma vectorial para la ecuación $\vec{v}_{pB} = \vec{v}_{pA} + \vec{v}_{AB}$. Incluya ejes de coordenadas en el dibujo.
3. Calcule la incógnita en cuestión. Utilice la trigonometría cuando sea necesario.

COMPROBACIÓN Asegúrese de que obtiene la velocidad o posición del cuerpo respecto del sistema de referencia correcto.

APÉNDICE DE MATEMÁTICAS INTEGRADO

Esta edición ha mejorado el apoyo matemático a los estudiantes que estudian Matemáticas al mismo tiempo que introducción a la Física o a los estudiantes que requieren repasar las Matemáticas.

El **Apéndice de Matemáticas completo**

- revisa resultados básicos de álgebra, geometría, trigonometría y cálculo,
- relaciona conceptos matemáticos con conceptos físicos del libro,
- proporciona Ejemplos y Problemas Prácticos para que los estudiantes puedan comprobar su comprensión de los conceptos matemáticos.

Ejemplo M.13 **Desintegración radiactiva del cobalto-60**

El período de semidesintegración del cobalto-60 (^{60}Co) es 5,27 años. A $t = 0$ se tiene una muestra de ^{60}Co de masa 1,20 mg. ¿Cuánto tiempo t (en años) habrá de transcurrir para que 0,400 mg de la muestra de ^{60}Co se hayan desintegrado?

PLANTEAMIENTO En la deducción del período de semidesintegración pusimos $N/N_0 = 1/2$. En este ejemplo, hemos de hallar el tiempo de permanencia de dos tercios de la muestra, es decir, cuando la fracción N/N_0 sea de 0,667.

SOLUCIÓN

1. Expresar la fracción N/N_0 como una función exponencial: $\frac{N}{N_0} = 0{,}667 = e^{-\lambda t}$
2. Obtener los valores recíprocos de ambos miembros: $\frac{N_0}{N} = 1{,}50 = e^{\lambda t}$
3. Despejar t: $t = \frac{\ln 1{,}50}{\lambda} = \frac{0{,}405}{\lambda}$
4. La constante de desintegración está relacionada con el período de semidesintegración por medio de $\lambda = (\ln 2)/t_{1/2}$ (ecuación M.70). Sustituir $(\ln 2)/t_{1/2}$ por λ y calcular el tiempo: $t = \frac{\ln 1{,}5}{\ln 2} t_{1/2} = \frac{\ln 1{,}5}{\ln 2} \times 5{,}27 \text{ años} = 3{,}08 \text{ años}$

COMPROBACIÓN Para que la masa de una muestra de ^{60}Co decreciese hasta el 50% de su masa inicial habrían de transcurrir 5,27 años. Por lo tanto, es de esperar que la muestra tardase menos de 5,27 años para perder el 33,3% de su masa. Por tanto, el resultado obtenido (3,08 años), concuerda con lo esperado.

PROBLEMAS PRÁCTICOS

27. La constante de tiempo de descarga de un condensador en ur que tarda el condensador en descargarse hasta e^{-1} (o sea 0,368) $\tau = 1$ s para un condensador, ¿cuánto tiempo t (en segundos) descargarse hasta el 50% de su carga inicial?
28. Si la población de coyotes en un determinado lugar está creci por década y continúa creciendo al mismo ritmo indefinidamer canzará una población 1,5 veces la actual?

M.12 CÁLCULO INTEGRAL

El **cálculo integral** se puede considerar el inverso del cálculo diferencial. Si una función $f(t)$ se integra, se obtiene una función $F(t)$, de forma que $f(t)$ es la derivada de $F(t)$ con respecto a t.

LA INTEGRAL COMO UN ÁREA BAJO UNA CURVA. ANÁLISIS DIMENSIONAL

La integración está relacionada con el problema de hallar el área bajo una curva. La figura M.27 muestra una función $f(t)$. El área del elemento sombreado es aproximadamente $f_i\,\Delta t_i$, en donde f_i se calcula en un punto cualquiera del intervalo Δt_i. Esta aproximación mejora si Δt_i es muy pequeño. Se halla el área total desde t_1 hasta t_2 sumando todos los elementos de área desde t_1 a t_2 y tomando el límite cuando Δt_i tiende a cero. Este límite se denomina la **integral** de f extendida al intervalo t_1, t_2 y se escribe

$$\int f\,dt = \text{área}_i = \lim_{\Delta t_i \to 0} \sum_i f_i \Delta t_i \qquad \text{M.74}$$

Las dimensiones físicas de una integral de una función $f(t)$ se hallan multiplicando las dimensiones del integrando (la función que se ha de integrar) por las dimensiones de la variable de in-

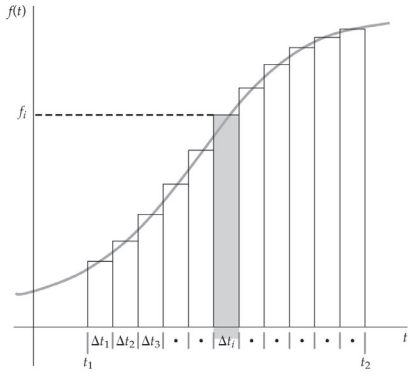


FIGURA M.27 Función general $f(t)$. El área del elemento sombreado es aproximadamente $f_i\,\Delta t_i$, en donde f_i se calcula para un punto cualquiera del intervalo.

Además, las notas al margen permiten a los estudiantes ver fácilmente la relación entre los conceptos físicos del texto y los conceptos matemáticos.

Véase el
Apéndice de matemáticas
para más información sobre
Cálculo diferencial

PEDAGOGÍA PARA ASEGURAR LA COMPRENSIÓN CONCEPTUAL

Se han añadido herramientas prácticas para los estudiantes para facilitar un mejor comprensión conceptual de la física.

- Se han introducido nuevos **Ejemplos conceptuales**, para ayudar a los estudiantes a comprender en profundidad conceptos físicos esenciales. Estos ejemplos utilizan la estrategia **Planteamiento**, **Solución** y **Comprobación**, de modo que los estudiantes no sólo obtienen una comprensión conceptual básica sino que tienen que evaluar sus respuestas.

Ejemplo 8.12 **Colisiones con masilla** ***Conceptual***

María tiene dos bolas de la misma masa, una bola de masilla y otra de goma. Lanza la bola de masilla contra un bloque suspendido por dos cuerdas como se muestra en la figura 8.20. La bola impacta contra el bloque y cae al suelo. Como consecuencia, el bloque asciende hasta una altura máxima h. Si hubiera lanzado la bola de goma con la misma velocidad, ¿el bloque habría ascendido a una altura mayor que h? La goma, a diferencia de la masilla, es elástica y hubiera rebotado contra el bloque.

PLANTEAMIENTO Durante el impacto, el cambio de momento del sistema bola-bloque es cero. Cuanto mayor es el cambio de momento de la bola, mayor será el cambio de momento del bloque. ¿Aumenta más el cambio de momento de la bola si rebota en el bloque que si no lo hace?

SOLUCIÓN

La bola de masilla pierde una fracción importante de su momento inicial. La bola de goma perdería todo el momento inicial para ganar momento en la dirección opuesta. Por tanto, la bola de goma perdería mayor cantidad de momento que la bola de masilla.

El bloque ascendería hasta una mayor altura después de ser impactado con la bola de goma que si hubiese sido impactado por la bola de masilla.

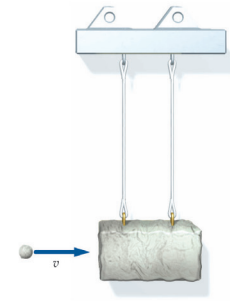


FIGURA 8.20

COMPROBACIÓN El bloque ejerce un impulso hacia atrás sobre la bola de masilla hasta hacerla parar. El mismo impulso hace detener la bola de goma, pero además el bloque ejerce un impulso adicional que la hacer retroceder. Así, el bloque ejerce un mayor impulso sobre la bola de goma que sobre la de masilla. Según la tercera ley de Newton, el impulso de la bola sobre el bloque es igual y opuesto al impulso del bloque sobre la bola. Entonces, la bola de goma ejerce un impulso mayor sobre el bloque confiriéndole un mayor cambio de momento.

- Las nuevas **Comprobaciones de conceptos** facilitan a los estudiantes comprobar su comprensión conceptual de conceptos físicos mientras leen los capítulos. Las respuestas están situadas al final de cada capítulo para permitir una comprobación inmediata. Las comprobaciones de conceptos se colocan cerca de temas relevantes, de modo que los estudiantes puedan releer inmediatamente cualquier material que no comprendan del todo.

- Los nuevos **avisos de errores frecuentes**, identificados mediante signos de exclamación, ayudan a los estudiantes a evitar errores habituales. Estos avisos están situados cerca de los temas que habitualmente causan confusión, de manera que los estudiantes puedan resolver de inmediato cualquier dificultad.

COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 3.1

La figura 3.9 es el diagrama del movimiento de la saltadora antes, durante y después del instante de tiempo t_6, cuando se halla momentáneamente en reposo en el punto más bajo de su descenso. En la parte de su ascenso mostrada en el esquema, la velocidad de la saltadora aumenta. Utilice este diagrama para determinar la dirección de la aceleración de la saltadora (a) en el instante t_6 y (b) en el instante t_9.

donde U_0 la constante arbitraria de integración, es el valor de la energía potencial para $y = 0$. Como sólo definimos la variación de energía potencial, el valor real de U no es importante. Por ejemplo, si a la energía potencial gravitatoria del sistema Tierra-esquiador se le asigna un valor igual a cero cuando el esquiador está en el fondo de la pista, su valor a la altura h sobre este nivel es mgh. También podemos asignar el valor cero de energía potencial al momento en que el esquiador está en un punto P a medio camino de la pendiente, en cuyo caso su valor en cualquier otro punto sería mgy, donde y es la distancia del esquiador respecto al punto P.

Tenemos libertad para dar a U el valor cero en cualquier punto de referencia.

NUEVO! TEMAS DE ACTUALIDAD EN FÍSICA

Los **temas de actualidad en Física**, que aparecen al final de ciertos capítulos, tratan de aplicaciones actuales de la Física y relacionan estas aplicaciones con conceptos descritos en los capítulos. Estos temas van desde un parque eólico hasta termómetros moleculares y motores de detonación pulsar.

Temas de actualidad en Física

Soplando aire cálidos

Los parques eólicos están desperdigados por la costa danesa, las planicies del alto medio-oeste de EE.UU. y las montañas desde California hasta Vermont. El aprovechamiento de la energía cinética del viento no es nada nuevo. Durante siglos, los molinos de viento se han utilizado para bombear agua, ventilar minas[1] y moler el grano.

En la actualidad, las turbinas de viento hacen funcionar generadores eléctricos. Esas turbinas transforman energía cinética en energía electromagnética. Las turbinas modernas tienen precios, tamaños y rendimientos muy variados. Algunas de ellas son pequeñas y sencillas máquinas que cuestan unos 500 dólares y producen unos 100 watts de potencia.[2] Otras son gigantes y complejas y cuestan unos 2 millones de dólares pero generan hasta 2,5 MW por turbina.[3] Todas ellas funcionan gracias a una fuente de energía fácilmente disponible —el viento.

La teoría que hay detrás de la conversión de energía cinética en electromagnética es simple. Las moléculas de aire golpean sobre las aspas de la hélice y hacen girar la turbina. Las aspas hacer girar unos engranajes que hacen aumentar la velocidad de rotación que a su vez hace girar el rotor generador. El generador envía energía electromagnética a cables que soportan alta tensión.

Sin embargo, la conversión de la energía cinética del viento en energía electromagnética no es perfectamente eficiente; de hecho, no puede ser 100% eficiente. Si las turbinas convirtieran completamente la energía cinética del viento en energía eléctrica, el aire saldría de las turbinas sin energía cinética. Es decir, las turbinas pararían el aire. Si la turbina parase completamente el aire, éste fluiría alrededor de la turbina en lugar de fluir a través de ella.

Así, la turbina debe ser capaz de capturar la energía cinética del aire en movimiento y de evitar el flujo de aire a su alrededor. Las turbinas propulsadas por hélices son las más comunes y su eficiencia teórica varía de 30% a 59%.[4] (Las eficiencias teóricas varían en función de cómo el aire fluye alrededor de la turbina y a través de las hélices.)

En resumen, ni la más eficiente de las turbinas puede convertir el 100% de la energía disponible. ¿Qué sucede? Antes de llegar a la turbina el aire fluye de forma laminar mientras que al dejar atrás la turbina el aire se vuelve turbulento. La componente rotacional del movimiento del aire de detrás de la turbina, aumenta su energía aunque también hay alguna disipación debida a la viscosidad del aire. Si un determinado volumen de aire se mueve más lentamente, aparecerá un rozamiento entre este aire y el aire más veloz que fluye a su alrededor.[5] Las hélices se calientan y el aire también. Los engranajes de la turbina también disipan energía debido al rozamiento. Las hélices vibran individualmente —la energía absorbida para producir estas vibraciones también hace disminuir la eficiencia. Finalmente, la turbina necesita corriente para hacer funcionar los motores que lubrican los engranajes y el motor que orienta la turbina en la dirección más apropiada para la captura del viento.

En definitiva, la mayoría de turbinas funcionan con una eficiencia de entre un 10 y un 20 por ciento,[6] pero siguen siendo un recurso energético más limpio que el petróleo. Uno de los propietarios de turbinas eólicas decía, "Lo fundamental del negocio de las turbinas radica en que nos ayuda a controlar nuestro futuro".[7]

Un parque eólico que convierte la energía cinética del aire en energía eléctrica. *(Image Slate.)*

MEDIOS DE DIFUSIÓN Y SUPLEMENTOS IMPRESOS

Todos los suplementos de la obra están disponibles en Internet en la página www.reverte.com/microsites/tipler6ed.

FLEXIBILIDAD PARA LOS CURSOS DE FÍSICA

Nos damos cuenta de que no todos los cursos de física son iguales. Para facilitar la utilización del libro, *Física para la ciencia y la tecnología* se halla disponible en las siguientes versiones:

Volumen 1	*Mecánica/Oscilaciones y ondas/Termodinámica* (Capítulos 1–20, R) 978-84-291-4429-1
Volumen 2	*Electricidad y magnetismo/Luz* (Capítulos 21–33) 978-84-291-4430-7
Volumen 1A	*Mecánica* (Capítulos 1–13) 978-84-291-4421-5
Volumen 1B	*Oscilaciones y ondas* (Capítulos 14–16) 978-84-291-4422-2
Volumen 1C	*Termodinámica* (Capítulos 17–20) 978-84-291-4423-9
Volumen 2A	*Electricidad y magnetismo* (Capítulos 21–30) 978-84-291-4424-6
Volumen 2B	*Luz* (Capítulos 31–33) 978-84-291-4425-3
Física moderna	*Mecánica cuántica, relatividad y estructura de la materia* (Capítulos R, 34–41) 978-84-291-4426-0

Apéndices y respuestas 978-84-291-4427-7

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a los diversos profesores, estudiantes, colaboradores y amigos que han contribuido a esta edición y a las anteriores.

Anthony J. Buffa, profesor emérito en California Polytechnic State University en California, escribió muchos de los nuevos problemas que aparecen al final de los capítulos y editó las secciones de problemas del final de cada capítulo. Laura Runkle escribió los Temas de actualidad en Física. Richard Mickey revisó la Revisión de matemáticas de la quinta edición, que ahora constituye el Apéndice de matemáticas de la sexta edición. David Mills, profesor emérito en el College of the Redwoods en California, revisó a fondo el Manual de Soluciones. Para redactar este libro y para comprobar la precisión y exactitud del texto y los problemas hemos contado con la ayuda inestimable de los siguientes profesores:

Thomas Foster
Southern Illinois University

Karamjeet Arya
San Jose State University

Mirley Bala
Texas A&M University—Corpus Christi

Michael Crivello
San Diego Mesa College

Carlos Delgado
Community College of Southern Nevada

David Faust
Mt. Hood Community College

Robin Jordan
Florida Atlantic University

Jerome Licini
Lehigh University

Dan Lucas
University of Wisconsin

Laura McCullough
University of Wisconsin, Stout

Jeannette Myers
Francis Marion University

Marian Peters
Appalachian State University

Todd K. Pedlar
Luther College

Paul Quinn
Kutztown University

Peter Sheldon
Randolph-Macon Woman's College

Michael G. Strauss
University of Oklahoma

Brad Trees
Ohio Wesleyan University

George Zober
Yough Senior High School

Patricia Zober
Ringgold High School

Muchos profesores y estudiantes han realizado revisiones exhaustivas y útiles de uno o más capítulos de esta edición. Cada uno de ellos ha contribuido de un modo fundamental a mejorar la calidad de esta revisión, y merecen por ello nuestro agradecimiento. Nos gustaría dar las gracias a los siguientes revisores:

Ahmad H. Abdelhadi
James Madison University

Edward Adelson
Ohio State University

Royal Albridge
Vanderbilt University

J. Robert Anderson
University of Maryland, College Park

Toby S. Anderson
Tennessee State University

Wickram Ariyasinghe
Baylor University

Yildirim Aktas
University of North Carolina, Charlotte

Eric Ayars
California State University

James Battat
Harvard University

Eugene W. Beier
University of Pennsylvania

Peter Beyersdorf
San Jose State University

Richard Bone
Florida International University

Juliet W. Brosing
Pacific University

Ronald Brown
California Polytechnic State University

Richard L. Cardenas
St. Mary's University

Troy Carter
University of California, Los Angeles

Alice D. Churukian
Concordia College

N. John DiNardo
Drexel University

Jianjun Dong
Auburn University

Fivos R Drymiotis
Clemson University

Mark A. Edwards
Hofstra University

James Evans
Broken Arrow Senior High

Nicola Fameli
University of British Columbia

N. G. Fazleev
University of Texas at Arlington

Thomas Furtak
Colorado School of Mines

Richard Gelderman
Western Kentucky University

Yuri Gershtein
Florida State University

Paolo Gondolo
University of Utah

Benjamin Grinstein
University of California, San Diego

Parameswar Hari
University of Tulsa

Joseph Harrison
University of Alabama—Birmingham

Patrick C. Hecking
Thiel College

Kristi R. G. Hendrickson
University of Puget Sound

Linnea Hess
Olympic College

Mark Hollabaugh
Normandale Community College

Daniel Holland
Illinois State University

Richard D. Holland II
Southern Illinois University

Eric Hudson
Massachusetts Institute of Technology

David C. Ingram
Ohio University

Colin Inglefield
Weber State University

Nathan Israeloff
Northeastern University

Donald J. Jacobs
California State University, Northridge

Erik L. Jensen
Chemeketa Community College

Colin P Jessop
University of Notre Dame

Ed Kearns
Boston University

Alice K. Kolakowska
Mississippi State University

Douglas Kurtze
Saint Joseph's University

Eric T. Lane
University of Tennessee at Chattanooga

Christie L. Larochelle
Franklin & Marshall College

Mary Lu Larsen
Towson University

Clifford L. Laurence
Colorado Technical University

Bruce W. Liby
Manhattan College

Ramon E. Lopez
Florida Institute of Technology

Ntungwa Maasha
Coastal Georgia Community Collegee and University Center

Jane H MacGibbon
University of North Florida

A. James Mallmann
Milwaukee School of Engineering

Rahul Mehta
University of Central Arkansas

R. A. McCorkle
University of Rhode Island

Linda McDonald
North Park University

Kenneth McLaughlin
Loras College

Eric R. Murray
Georgia Institute of Technology

Jeffrey S. Olafsen
University of Kansas

Richard P. Olenick
University of Dallas

Halina Opyrchal
New Jersey Institute of Technology

Russell L. Palma
Minnesota State University—Mankato

Todd K. Pedlar
Luther College

Daniel Phillips
Ohio University

Edward Pollack
University of Connecticut

Michael Politano
Marquette University

Robert L. Pompi
SUNY Binghamton

Damon A. Resnick
Montana State University

Richard Robinett
Pennsylvania State University

John Rollino
Rutgers University

Daniel V. Schroeder
Weber State University

Douglas Sherman
San Jose State University

Christopher Sirola
Marquette University

Larry K. Smith
Snow College

George Smoot
University of California at Berkeley

Zbigniew M. Stadnik
University of Ottawa

Kenny Stephens
Hardin-Simmons University

Daniel Stump
Michigan State University

Jorge Talamantes
California State University, Bakersfield

Charles G. Torre
Utah State University

Brad Trees
Ohio Wesleyan University

John K. Vassiliou
Villanova University

Theodore D. Violett
Western State College

Hai-Sheng Wu
Minnesota State University—Mankato

Anthony C. Zable
Portland Community College

Ulrich Zurcher
Cleveland State University

También estamos en deuda con los revisores de ediciones anteriores. Por lo que nos gustaría dar las gracias a los siguientes revisores, quienes nos proporcionaron un apoyo imprescindible mientras realizábamos la cuarta y la quinta ediciones:

Edward Adelson
The Ohio State University

Michael Arnett
Kirkwood Community College

Todd Averett
The College of William and Mary

Yildirim M. Aktas
University of North Carolina at Charlotte

Karamjeet Arya
San Jose State University

Alison Baski
Virginia Commonwealth University

William Bassichis
Texas A&M University

Joel C. Berlinghieri
The Citadel

Gary Stephen Blanpied
University of South Carolina

Frank Blatt
Michigan State University

Ronald Brown
California Polytechnic State University

Anthony J. Buffa
California Polytechnic State University

John E. Byrne
Gonzaga University

Wayne Carr
Stevens Institute of Technology

George Cassidy
University of Utah

Lay Nam Chang
Virginia Polytechnic Institute

I. V. Chivets
Trinity College, University of Dublin

Harry T. Chu
University of Akron

Alan Cresswell
Shippensburg University

Robert Coakley
University of Southern Maine

Robert Coleman
Emory University

Brent A. Corbin
UCLA

Andrew Cornelius
University of Nevada at Las Vegas

Mark W. Coffey
Colorado School of Mines

Peter P. Crooker
University of Hawaii

Jeff Culbert
London, Ontario

Paul Debevec
University of Illinois

Ricardo S. Decca
Indiana University-Purdue University

Robert W. Detenbeck
University of Vermont

N. John DiNardo
Drexel University

Bruce Doak
Arizona State University

Michael Dubson
University of Colorado at Boulder

John Elliott
University of Manchester, England

William Ellis
University of Technology — Sydney

Colonel Rolf Enger
U.S. Air Force Academy

John W. Farley
University of Nevada at Las Vegas

David Faust
Mount Hood Community College

Mirela S. Fetea
University of Richmond

David Flammer
Colorado School of Mines

Philip Fraundorf
University of Missouri, Saint Louis

Tom Furtak
Colorado School of Mines

James Garland
Retired

James Garner
University of North Florida

Ian Gatland
Georgia Institute of Technology

Ron Gautreau
New Jersey Institute of Technology

David Gavenda
University of Texas at Austin

Patrick C. Gibbons
Washington University

David Gordon Wilson
Massachusetts Institute of Technology

Christopher Gould
University of Southern California

Newton Greenberg
SUNY Binghamton

John B. Gruber
San Jose State University

Huidong Guo
Columbia University

Phuoc Ha
Creighton University

Richard Haracz
Drexel University

Clint Harper
Moorpark College

Michael Harris
University of Washington

Randy Harris
University of California at Davis

Tina Harriott
Mount Saint Vincent, Canada

Dieter Hartmann
Clemson University

Theresa Peggy Hartsell
Clark College

Kristi R.G. Hendrickson
University of Puget Sound

Michael Hildreth
University of Notre Dame

Robert Hollebeek
University of Pennsylvania

David Ingram
Ohio University

Shawn Jackson
The University of Tulsa

Madya Jalil
University of Malaya

Monwhea Jeng
University of California — Santa Barbara

James W. Johnson
Tallahassee Community College

Edwin R. Jones
University of South Carolina

Ilon Joseph
Columbia University

David Kaplan
University of California — Santa Barbara

William C. Kerr
Wake Forest University

John Kidder
Dartmouth College

Roger King
City College of San Francisco

James J. Kolata
University of Notre Dame

Boris Korsunsky
Northfield Mt. Hermon School

Thomas O. Krause
Towson University

Eric Lane
University of Tennessee, Chattanooga

Andrew Lang (graduate student)
University of Missouri

David Lange
University of California — Santa Barbara

Donald C. Larson
Drexel University

Paul L. Lee
California State University, Northridge

Peter M. Levy
New York University

Jerome Licini
Lehigh University

Isaac Leichter
Jerusalem College of Technology

William Lichten
Yale University

Robert Lieberman
Cornell University

Fred Lipschultz
University of Connecticut

Graeme Luke
Columbia University

Dan MacIsaac
Northern Arizona University

Edward McCliment
University of Iowa

Robert R. Marchini
The University of Memphis

Peter E. C. Markowitz
Florida International University

Daniel Marlow
Princeton University

Fernando Medina
Florida Atlantic University

Howard McAllister
University of Hawaii

John A. McClelland
University of Richmond

Laura McCullough
University of Wisconsin at Stout

M. Howard Miles
Washington State University

Matthew Moelter
University of Puget Sound

Eugene Mosca
U.S. Naval Academy

Carl Mungan
U.S. Naval Academy

Taha Mzoughi
Mississippi State University

Charles Niederriter
Gustavus Adolphus College

John W. Norbury
University of Wisconsin at Milwaukee

Aileen O'Donughue
St. Lawrence University

Jack Ord
University of Waterloo

Jeffry S. Olafsen
University of Kansas

Melvyn Jay Oremland
Pace University

Richard Packard
University of California

Antonio Pagnamenta
University of Illinois at Chicago

George W. Parker
North Carolina State University

John Parsons
Columbia University

Dinko Pocanic
University of Virginia

Edward Pollack
University of Connecticut

Robert Pompi
The State University of New York at Binghamton

Bernard G. Pope
Michigan State University

John M. Pratte
Clayton College and State University

Brooke Pridmore
Clayton State College

Yong-Zhong Qian
University of Minnesota

David Roberts
Brandeis University

Lyle D. Roelofs
Haverford College

R. J. Rollefson
Wesleyan University

Larry Rowan
University of North Carolina at Chapel Hill

Ajit S. Rupaal
Western Washington University

Todd G. Ruskell
Colorado School of Mines

Lewis H. Ryder
University of Kent, Canterbury

Andrew Scherbakov
Georgia Institute of Technology

Bruce A. Schumm
University of California, Santa Cruz

Cindy Schwarz
Vassar College

Mesgun Sebhatu
Winthrop University

Bernd Schuttler
University of Georgia

Murray Scureman
Amdahl Corporation

Marllin L. Simon
Auburn University

Scott Sinawi
Columbia University

Dave Smith
University of the Virgin Islands

Wesley H. Smith
University of Wisconsin

Kevork Spartalian
University of Vermont

Zbigniew M. Stadnik
University of Ottawa

G. R. Stewart
University of Florida

Michael G. Strauss
University of Oklahoma

Kaare Stegavik
University of Trondheim, Norway

Jay D. Strieb
Villanova University

Dan Styer
Oberlin College

Chun Fu Su
Mississippi State University

Jeffrey Sundquist
Palm Beach Community College — South

Cyrus Taylor
Case Western Reserve University

Martin Tiersten
City College of New York

Chin-Che Tin
Auburn University

Oscar Vilches
University of Washington

D. J. Wagner
Grove City College
Columbia University

George Watson
University of Delaware

Fred Watts
College of Charleston

David Winter

John A. Underwood
Austin Community College

John Weinstein
University of Mississippi

Stephen Weppner
Eckerd College

Suzanne E. Willis
Northern Illinois University

Frank L. H. Wolfe
University of Rochester

Frank Wolfs
University of Rochester

Roy C. Wood
New Mexico State University

Ron Zammit
California Polytechnic State University

Dean Zollman
Kansas State University

Yuriy Zhestkov
Columbia University

Fulin Zuo
University of Miami

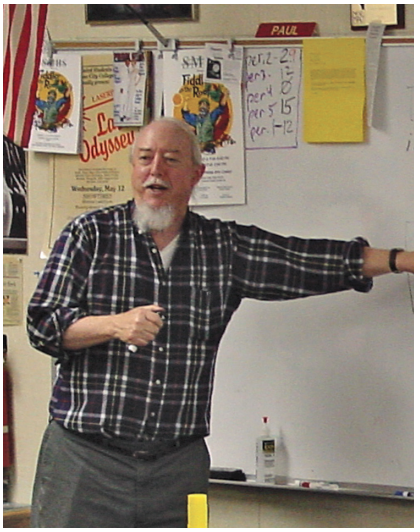
Es obvio que nuestro trabajo no termina nunca; por ello, esperamos recibir comentarios y sugerencias de nuestros lectores para poder mejorar el texto y corregir cualquier error. Si usted cree que ha hallado un error, o tiene cualquier otro comentario, sugerencia o pregunta, envíenos una nota a **producción@reverte.com** Incorporaremos las correcciones en el texto en posteriores reimpresiones.

Por último, nos gustaría agradecer a nuestros amigos de W. H. Freeman and Company su ayuda y aliento. Susan Brennan, Clancy Marshall, Kharissia Pettus, Georgia Lee Hadler, Susan Wein, Trumbull Rogers, Connie Parks, John Smith, Dena Digilio Betz, Ted Szczepanski y Liz Geller, quienes fueron muy generosos con su creatividad y duro trabajo en cada etapa del proceso.

También estamos agradecidos por las contribuciones y ayuda de nuestros colegas Larry Tankersley, John Ertel, Steve Montgomery y Don Treacy.

Acerca de los autores

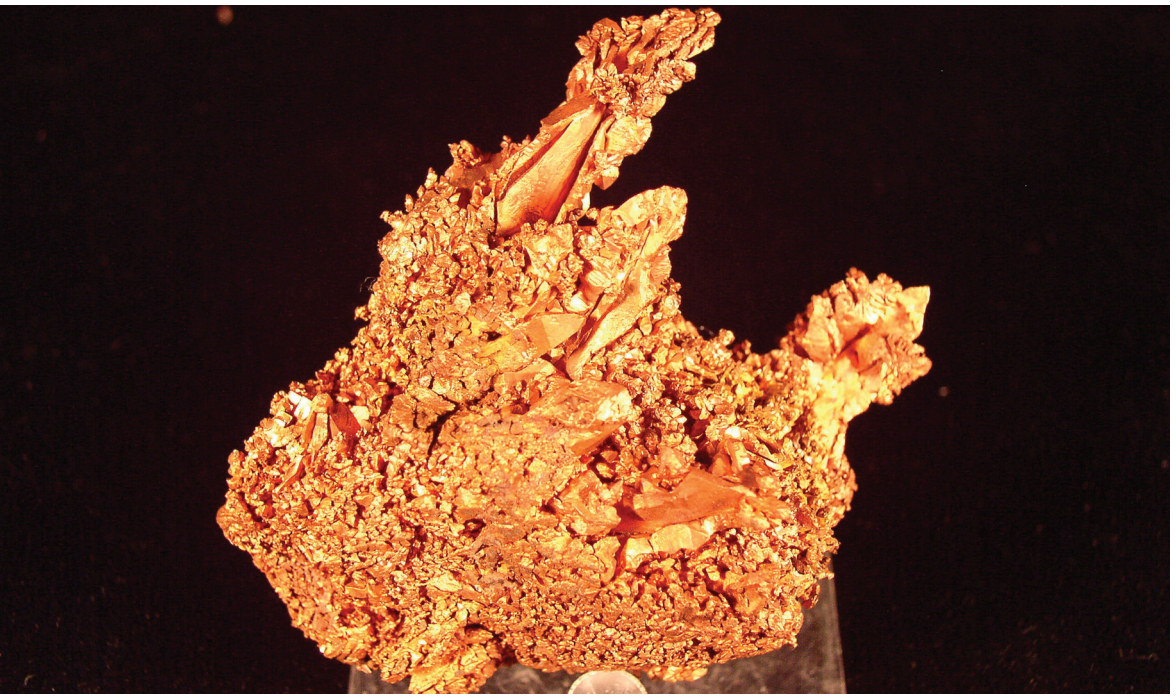
Paul Tipler nació en la pequeña ciudad agrícola de Antigo, Wisconsin, en 1933. Realizó sus estudios medios en Oshkosh, Wisconsin, en donde su padre era superintendente de las Escuelas Públicas. Recibió el título de Bachelor of Science en la Universidad de Purdue en 1955 y obtuvo su Ph.D. en la Universidad de Illinois, en donde estudió la estructura del núcleo. Impartió la enseñanza durante un año en la Wesleyan University de Connecticut mientras redactaba su tesis. Después se trasladó a la Universidad de Oakland en Michigan, donde fue uno de los primeros miembros del Departamento de Física, y desempeñó un papel importante en el desarrollo de los planes de estudio. Durante los siguientes 20 años, enseñó casi todas las disciplinas de la física y escribió la primera y segunda ediciones de sus ampliamente difundidos textos *Física Moderna* (1969, 1978) y *Física* (1976, 1982). En 1982, se mudó a Berkeley, California, donde ahora reside y donde escribió *Física preuniversitaria* (1987) y la tercera edición de *Física* (1991). Además de la física, sus aficiones incluyen la música, excursionismo y camping. Es un excelente pianista de jazz y un buen jugador de póker.



Gene Mosca nació en la ciudad de Nueva York y se crió en Shelter Island, en el Estado de Nueva York. Estudió en la Universidad de Villanova, en la Universidad de Michigan y en la Universidad de Vermont, donde obtuvo su Ph.D. en física. Recientemente jubilado, Gene Mosca ha sido profesor en la U.S. Naval Academy, donde fue el impulsor de numerosas mejoras en la enseñanza de la Física, tanto en los laboratorios como en las aulas. Proclamado por Paul Tipler como "el mejor crítico que he tenido", Mosca se ha convertido en coautor del libro a partir de su quinta edición.

PARTE IV

ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO



CAPÍTULO 21

EL COBRE ES UN CONDUCTOR CUYAS PROPIEDADES SON ÚTILES PORQUE HACEN POSIBLE EL TRANSPORTE DE LA ELECTRICIDAD. *(Brooks R. Dillard/www.yuprocks.com)*

Campo eléctrico I: distribuciones discretas de carga

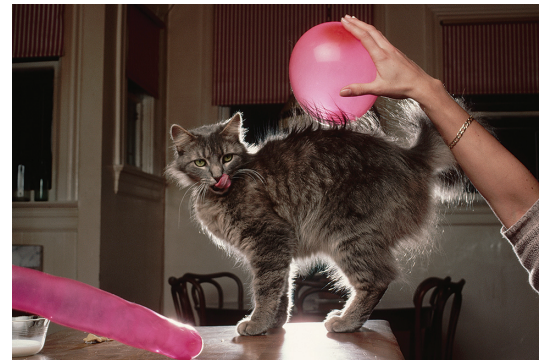
21.1 Carga eléctrica
21.2 Conductores y aislantes
21.3 Ley de Coulomb
21.4 El campo eléctrico
21.5 Líneas de campo eléctrico
21.6 Acción del campo eléctrico sobre las cargas

? ¿Cuál es la carga total de los electrones de una moneda? (Véase el ejemplo 21.1.)

Hoy en día, nuestra vida diaria depende extraordinariamente de la electricidad, mientras que hace un siglo sólo disponíamos de alguna lámpara eléctrica. Sin embargo, aunque el uso generalizado de la electricidad es muy reciente, su estudio tiene una larga historia que comienza mucho antes de que apareciese la primera lámpara eléctrica. Las primeras observaciones de la atracción eléctrica fueron realizadas por los antiguos griegos. Éstos observaron que al frotar el ámbar, éste atraía pequeños objetos como pajitas o plumas. Ciertamente, la palabra "eléctrico" procede del vocablo griego asignado al ámbar, *elektrón*.

Actualmente, la electricidad está en un proceso continuo de estudio, de investigación y de búsqueda de nuevos usos. Los ingenieros eléctricos mejoran la tecnología existente en materia eléctrica, incrementando el rendimiento y eficacia de diferentes dispositivos eléctricos, tales como automóviles híbridos, plantas de producción eléctrica, etc. Pinturas de fijación electrostática se utilizan en la industria de la automoción, en diversas partes del motor y de la estructura general del automóvil. Los procesos electrostáticos de cromación y de fijación de la pintura permiten realizar recubrimientos más duraderos, y de forma más ecológica y cuidadosa del medio ambiente que los que utilizan pinturas líquidas, dado que no utilizan ningún tipo de disolvente.

En este capítulo, se inicia el estudio de la electricidad con la electrostática*, que trata de las cargas eléctricas en reposo. Después de introducir el concepto de carga eléctrica, analizaremos brevemente el concepto de conductores y aislantes y la forma en que un conductor puede adquirir una carga. A continuación, estudiaremos la ley de Coulomb, que describe la fuerza ejercida por una carga eléctrica sobre otra. Posteriormente, introduciremos el concepto de campo eléctrico y veremos cómo puede describirse mediante las líneas de campo, las cuales indican el módulo y la dirección del campo, del mismo modo en que describíamos el campo de velocidades de un fluido en movimiento mediante líneas de corriente (capítulo 13). Por último, abordaremos el comportamiento de las cargas puntuales y los dipolos en campos eléctricos.*



Un gato y un globo hinchado. *(Roger Ressmeyer/CORBIS.)*

21.1 CARGA ELÉCTRICA

Consideremos una barra de caucho que se frota con un trozo de piel y se suspende de una cuerda que puede girar libremente. Si aproximamos a esta barra una segunda barra de caucho, frotada también con una piel, observaremos que las barras se repelen entre sí (figura 21.1*a*). El mismo resultado se obtiene si repetimos el mismo experimento con dos barras de vidrio que han sido frotadas con seda (figura 21.1*b*). Sin embargo, si utilizamos una barra de caucho frotada con piel y una varilla de vidrio frotada con seda, observaremos que las barras se atraen entre sí (figura 21.1*c*).

Al frotar una barra, ésta se carga eléctricamente. Repitiendo el experimento con diversos tipos de materiales, vemos que todos los objetos cargados pueden clasificarse en dos grupos: aquellos que se cargan como la barra de plástico frotada con un trozo de piel y los que se cargan como la varilla de vidrio frotada con un paño de seda. Los objetos de un mismo grupo se repelen entre sí, mientras que los de grupos diferentes se atraen. Benjamín Franklin propuso un modelo de electricidad para explicar este fenómeno. Sugirió que todo objeto posee una cantidad *normal* de electricidad y que cuando dos objetos están muy próximos, por ejemplo cuando se frotan entre sí, parte de la electricidad se transfiere de un cuerpo al otro: así pues, uno tiene un exceso de carga y el otro una deficiencia de carga de valor igual. Franklin describió las cargas resultantes con los signos más y menos. Al tipo de carga adquirida por una barra de vidrio frotada con un paño de seda le llamó positiva, lo cual significaba que el paño de seda adquiría una carga negativa de igual magnitud.

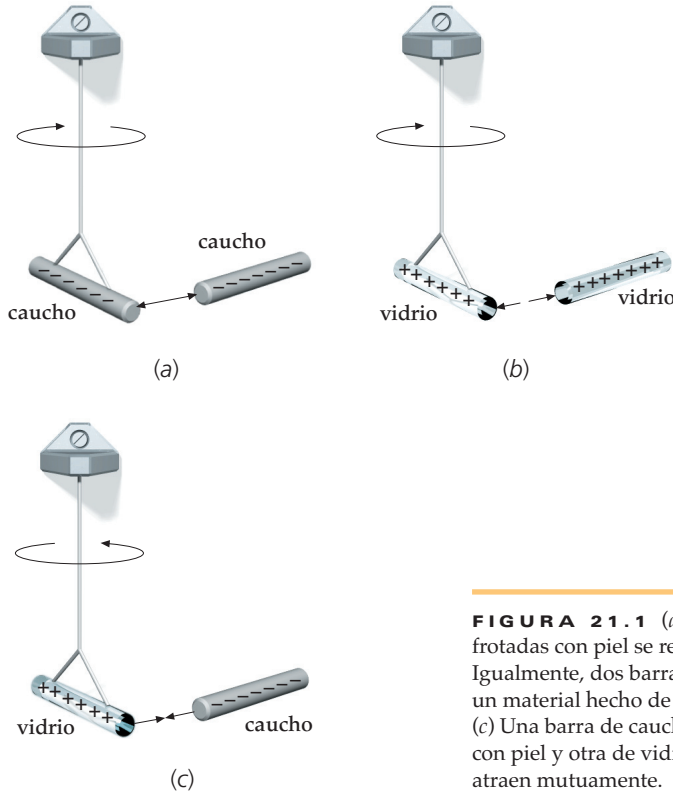


FIGURA 21.1 (*a*) Dos barras de caucho frotadas con piel se repelen mutuamente. (*b*) Igualmente, dos barras de vidrio frotadas con un material hecho de seda, se repelen entre sí. (*c*) Una barra de caucho que ha sido frotada con piel y otra de vidrio frotada con seda se atraen mutuamente.

Según esta elección de Franklin, el plástico frotado con una piel adquiere una carga negativa y la piel adquiere una carga positiva de igual magnitud. Dos objetos que portan el mismo tipo de carga se repelen entre sí, mientras que si portan cargas opuestas se atraen mutuamente (figura 21.1).

Actualmente, es bien conocido que cuando un vidrio se frota con un trozo de seda, se transfieren electrones del vidrio al pedazo de seda. De acuerdo con la convención de Franklin, todavía en uso, la seda está cargada negativamente, y, consecuentemente, decimos que los electrones tienen carga negativa. La tabla 21.1 corresponde a una versión reducida de una **serie triboeléctrica** (en griego *tribos* significa rozamiento). En esta serie, cuanto más baja es la ubicación de un material, mayor es su afinidad por captar electrones. Si dos materiales se ponen en contacto mediante rozamiento, se transfieren electrones del de la zona superior al de la inferior. Por ejemplo, electrones del nailon son transferidos al teflón cuando ambos se frotan entre sí.

Tabla 21.1 Serie triboeléctrica

+ Extremo positivo de la serie
Amianto
Vidrio
Nailon
Lana
Plomo
Seda
Aluminio
Papel
Algodón
Acero
Caucho (goma dura)
Níquel y cobre
Latón y plata
Goma sintética
Fibra acrílica
Plástico flexible
Polietileno
Teflón
Goma de silicona
− Extremo negativo de la serie

CUANTIZACIÓN DE LA CARGA

La materia está formada por átomos eléctricamente neutros. Cada átomo posee un pequeño, pero masivo, núcleo que contiene protones y neutrones. Los protones están cargados positivamente, mientras que los neutrones no poseen carga. El número de protones en el núcleo es el número atómico Z del elemento. Rodeando al núcleo existe un número igual de electrones negativamente cargados, de modo que el átomo posee una carga neta cero. La masa del electrón es aproximadamente 2000 veces menor que la del protón. Sin embargo, sus cargas son exactamente iguales pero de signo contrario. La carga del protón es e y la del electrón $-e$, siendo e la **unidad fundamental de carga**. La carga de un electrón o protón es una propiedad intrínseca de la partícula; del mismo modo, la masa y el espín de estas partículas son también propiedades intrínsecas de las mismas.

Todas las cargas observables se presentan en cantidades enteras de la unidad fundamental de carga e. Es decir, la carga está cuantizada. Toda carga Q presente en la naturaleza puede escribirse en la forma $Q = \pm Ne$, siendo N un número entero.* Sin embargo, en los objetos ordinarios, N es habitualmente un número muy grande y la carga parece ser continua, del mismo modo que el aire parece ser un medio continuo aunque realmente consta de muchas moléculas discretas. Por ejemplo, al cargar una barra de plástico frotándola con un trozo de piel se transfieren del orden de 10^{10} electrones a la barra.

CONSERVACIÓN DE LA CARGA

Cuando dos objetos se frotan entre sí, uno de ellos queda con un exceso de electrones y, por lo tanto, cargado negativamente, y el otro queda con un déficit de electrones y, en consecuencia, cargado positivamente. La carga total, suma de la de los dos objetos, no cambia. Es decir, la *carga se conserva*. La **ley de conservación de la carga** es una ley fundamental de la naturaleza. En ciertas interacciones entre partículas elementales puede ocurrir que los electrones se creen o destruyan. Sin embargo, en todos estos procesos, se producen o destruyen cantidades iguales de cargas negativas y positivas, de manera que la carga del universo no varía.

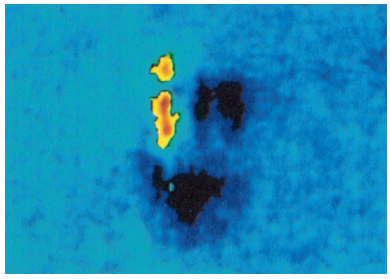
La unidad de carga del SI es el coulomb, el cual se define en función de la unidad de corriente o intensidad eléctrica, el ampere (A).† El **coulomb** (C) es la cantidad de carga que fluye a través de un cable conductor en un segundo cuando la intensidad de corriente en el cable es de un ampere. La unidad fundamental de carga eléctrica e está relacionada con el coulomb por

$$e = 1{,}602177 \times 10^{-19}\,\text{C} \approx 1{,}60 \times 10^{-19}\,\text{C} \qquad 21.1$$

UNIDAD FUNDAMENTAL DE CARGA

* En el modelo estándar de partículas elementales, los protones, neutrones y otras partículas elementales están constituidas por partículas aún más fundamentales y primigenias llamadas *quarks*, las cuales poseen cargas de $\pm\frac{1}{3}e$ o $\pm\frac{2}{3}e$. Los quarks no se han observado como partículas individuales. Sólo se han observado combinaciones de estas partículas elementales que constituyen una carga neta de $\pm Ne$, siendo N un número entero.

† El ampere (A) es la unidad de corriente eléctrica.



Carga por contacto. Una muestra de plástico de anchura 0,02 mm fue cargada mediante contacto con una pieza de níquel. Aunque el plástico posee una carga neta positiva, se aprecian regiones de carga negativa (oscuras) y regiones de carga positiva (amarillo). La fotografía se tomó barriendo una aguja cargada, de anchura 10^{-7} m, sobre la muestra y midiendo la fuerza electrostática sobre la aguja. *(Bruce Terris/IBM Almaden Research Center.)*

PROBLEMA PRÁCTICO 21.1
Una carga de 50 nC (1 nC = 10^{-9} C) puede producirse en el laboratorio simplemente frotando entre sí dos objetos. ¿Cuántos electrones deben ser transferidos para producir esta carga?

Ejemplo 21.1 ¿Cuánta carga hay en una moneda?

Una moneda de cobre* ($Z = 29$) tiene una masa de 3,10 g. ¿Cuál es la carga total de todos los electrones contenidos en la moneda?

PLANTEAMIENTO La carga total de los electrones contenidos en una moneda viene dada por el número de éstos, N_e, multiplicado por la carga de uno de ellos, $-e$. Por tanto, el número de electrones será 29 veces el número de átomos de cobre, N_{at}. Para determinar N_{at} hay que tener en cuenta que un mol de cualquier sustancia tiene un número de moléculas igual al número de Avogadro ($N_A = 6{,}02 \times 10^{23}$) y el número de gramos de un mol es la masa molecular M, que para el cobre es 63,5 g/mol. Como la molécula de cobre es monoatómica, determinaremos el número de átomos por gramo dividiendo el N_A (átomos por mol) por el peso molecular M (gramos por mol).

SOLUCIÓN

1. La carga total es el número de electrones multiplicado por la carga electrónica: $Q = N_e(-e)$

2. El número de electrones es el número atómico Z multiplicado por el número de átomos de cobre, N_{at}: $N_e = ZN_{at}$

3. Calcular el número de átomos de cobre en 3,10 g de este metal:
$$N_{at} = (3{,}10\text{ g})\frac{6{,}02 \times 10^{23}\text{ átomos/mol}}{63{,}5\text{ g/mol}} = 2{,}94 \times 10^{22}\text{ átomos}$$

4. Calcular el número de electrones, N_e:
$$N_e = ZN_{at} = (29\text{ electrones/átomo})(2{,}94 \times 10^{22}\text{ átomos}) = 8{,}53 \times 10^{23}\text{ electrones}$$

5. Utilizar este valor de N_e para determinar la carga total:
$$Q = N_e \times (-e) = (8{,}53 \times 10^{23}\text{ electrones})(-1{,}60 \times 10^{-19}\text{ C/electrón}) = \boxed{-1{,}37 \times 10^{5}\text{ C}}$$

COMPROBACIÓN Hay $29 \times (6{,}02 \times 10^{23})$ electrones en 63,5 g de cobre. Por lo tanto, en 3,5 gramos de este material hay $(3{,}10/63{,}5) \times 29 \times (6{,}02 \times 10^{23}) = 8{,}53 \times 10^{23}$ electrones, lo cual está de acuerdo con el paso 4 del resultado del ejercicio.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.2 Si cada habitante de los EE.UU. (aproximadamente 300 millones de habitantes) recibiera un millón de electrones, ¿qué porcentaje del número de electrones contenido en la moneda representaría?

* Desde 1793 hasta 1837, el penique estaba compuesto del 100% de cobre. En 1982, se cambió la composición pasando de 5% de cinc y 95% de cobre a una composición de 97,5% de cinc y 2,5% de cobre.

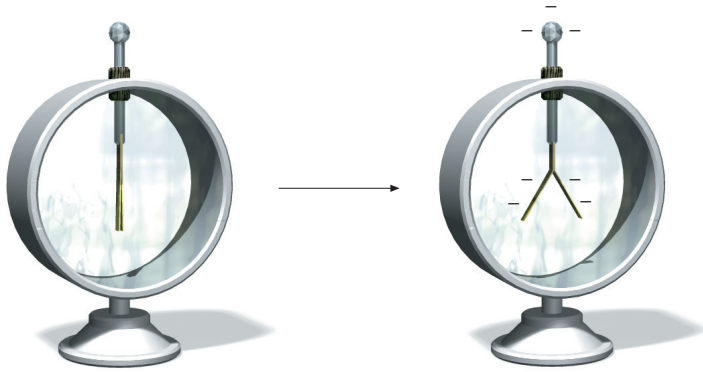


FIGURA 21.2 Electroscopio. Dos hojas de oro se conectan a una barra metálica terminada en la parte superior por una esfera de metal. Asimismo, las hojas están aisladas del recipiente. Cuando no están cargadas, las hojas cuelgan en dirección vertical, juntas. Cuando se toca la esfera con una barra de plástico cargada negativamente, se transfieren algunas cargas negativas de la barra a la esfera, y de ésta son conducidas a las hojas de oro, las cuales se separan entre ellas debido a la repulsión de sus respectivas cargas negativas. Si se toca la esfera con una barra de vidrio cargada positivamente, las hojas también se separan. (Poniendo en contacto la bola con una barra de vidrio cargada positivamente, las hojas de oro deberían separarse. En este caso, la barra de vidrio cargada positivamente atrae electrones de la esfera de metal, dejando una carga neta positiva en la bola, en la barra y en las hojas.)

21.2 CONDUCTORES Y AISLANTES

En muchos materiales, tales como el cobre y otros metales, parte de los electrones pueden moverse libremente en el seno del material. Estos materiales se denominan **conductores**. En otros materiales, tales como la madera o vidrio, todos los electrones están ligados a los átomos próximos y ninguno puede moverse libremente. Estos materiales se denominan **aislantes**.

En un átomo de cobre aislado, existen 29 electrones ligados al núcleo por atracción electrostática entre los electrones cargados negativamente y los núcleos cargados positivamente. Los electrones más externos están ligados más débilmente que los más internos a causa de su mayor distancia al núcleo y a la repulsión de los electrones más internos. Cuando un gran número de átomos de cobre se combinan en una pieza de cobre metálico, el enlace de los electrones de cada átomo individual se reduce debido a las interacciones con los átomos próximos. Uno o más de los electrones externos de cada átomo queda en libertad para moverse por todo el metal, del mismo modo que una molécula de gas se mueve en el interior de una caja. El número de electrones libres depende del metal de que se trate, pero generalmente es de alrededor de un electrón por átomo. Cuando a un átomo se le quita o se le añade un electrón, apareciendo una carga neta, se convierte en un **ion**. En el cobre metálico, los iones de cobre se distribuyen regularmente formando una *red*. Normalmente, un conductor es eléctricamente neutro porque existe un ion en la red portador de una carga positiva $+e$ por cada electrón libre portador de una carga negativa $-e$. La carga neta de un conductor puede variar por adición o extracción de electrones. Un conductor con una carga neta negativa tiene un exceso de electrones libres, mientras que un conductor con una carga neta positiva tiene un déficit de los mismos.

CARGA POR INDUCCIÓN

La conservación de la carga puede ilustrase mediante un método simple de cargar un conductor llamado **carga por inducción**, que se muestra en la figura 21.3. Dos esferas metálicas sin carga están en contacto. Al acercar a una de las esferas una barra cargada, los electrones fluyen de una esfera a la otra, acercándose a la barra si ésta se encuentra positivamente cargada o alejándose si su carga es negativa. Si la barra está cargada positivamente (figura 21.3*a*), atrae a los electrones y la esfera más próxima a la barra adquiere electrones de la otra. La esfera más próxima adquiere carga ne-

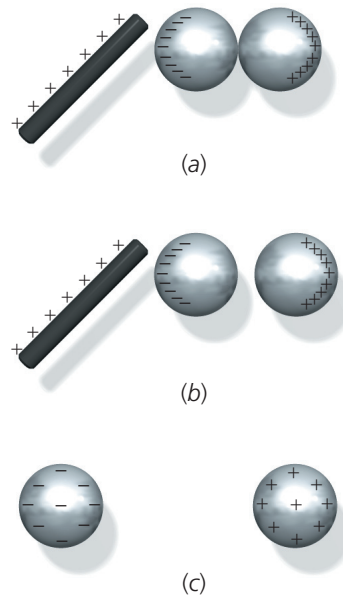


FIGURA 21.3 Carga por inducción. (*a*) Los dos conductores esféricos en contacto adquieren cargas opuestas cuando la barra cargada positivamente atrae a los electrones hacia la esfera de la izquierda. (*b*) Si las esferas se separan sin mover la barra de su posición, éstas retienen sus cargas iguales y opuestas. (*c*) Si la barra se retira y las esferas se separan, éstas quedan uniformemente cargadas con cargas iguales y opuestas.

COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 21.1

Una esfera conductora con carga $+Q$ se pone en contacto con otra esfera, también conductora e idéntica de tamaño a la anterior y con carga inicial nula. (*a*) ¿Cuál será la carga de cada esfera después de que se establezca el contacto? (*b*) Estando las esferas en contacto, una barra cargada positivamente se aproxima a una de estas esferas, causando una redistribución de las cargas de las dos esferas, de forma que la que está más próxima a la barra tiene una carga $-Q$. ¿Cuál es la carga de la otra esfera?

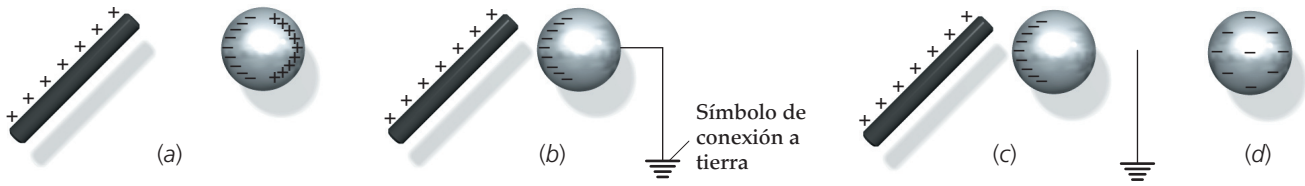


FIGURA 21.4 Inducción por conexión a tierra. (*a*) La carga libre sobre una esfera conductora se polariza mediante la barra cargada positivamente, que atrae las cargas negativas de la esfera. (*b*) Si la esfera se conecta a un conductor muy grande, tal como la Tierra, por medio de un alambre, los electrones del suelo neutralizan la carga positiva del lado más alejado de la barra y la esfera queda negativamente cargada. (*c*) La carga negativa permanece si el cable se desconecta antes de separar la barra. (*d*) Al quitar la barra, la esfera queda cargada negativamente de forma uniforme.

gativa y la más alejada queda con una carga neta igual, pero positiva. Cuando un conductor tiene cargas *separadas* iguales y opuestas se dice que está **polarizado**. Si las esferas se separan antes de retirar la barra, quedarán con cantidades iguales de cargas opuestas (figura 21.3*b*). Un resultado semejante se obtiene con una barra cargada negativamente; los electrones pasarían de la esfera más próxima a la más alejada.

La propia Tierra constituye un conductor que para muchos propósitos puede considerarse infinitamente grande y con un suministro de carga libre abundante. Cuando un conductor se pone en contacto con el suelo se dice que está **conectado a tierra**. Esto se representa esquemáticamente mediante un cable de conducción que termina en unas pequeñas líneas paralelas, como indica la figura 21.4*b*. La figura 21.4 muestra cómo puede inducirse una carga en un conductor simple transfiriendo electrones desde el suelo y, a continuación, interrumpiendo la conexión a tierra. (En la práctica, una persona que estuviera en el suelo tocando con sus manos la esfera podría servir como ejemplo de la demostración electrostática descrita aquí.)

COMPROBACIÓN CONCEPTUAL 21.2

Se cargan dos esferas idénticas conductoras mediante inducción electrostática y seguidamente se separan a gran distancia una de la otra; la esfera 1 tiene carga $+Q$ y la esfera 2, carga $-Q$. Se dispone de una tercera esfera idéntica a las otras dos e inicialmente descargada. Si las esferas 3 y 1 se ponen en contacto y, seguidamente, se separan, y luego se ponen en contacto la 3 y la 2 y se separan, ¿cuál será la carga final de cada una de las tres esferas?

El pararrayos de este edificio está conectado a tierra para conducir los electrones desde el suelo a las nubes cargadas positivamente a fin de neutralizarlas. *(© Grant Heilman.)*

Estas damas utilizan sombreros con cadenas metálicas que arrastran por el suelo, supuestamente para protegerse contra los rayos. *(Ann Roman Picture Library.)*

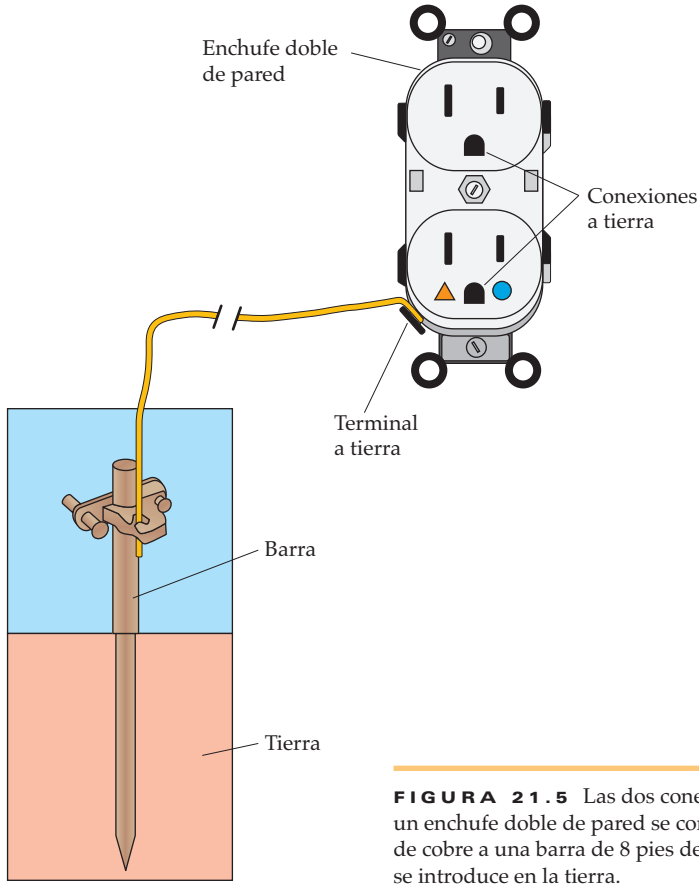
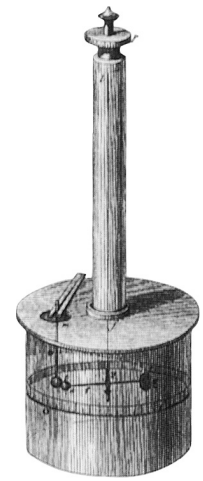


FIGURA 21.5 Las dos conexiones a tierra de un enchufe doble de pared se conectan con un hilo de cobre a una barra de 8 pies de longitud, la cual se introduce en la tierra.

21.3 LEY DE COULOMB

La fuerza ejercida por una carga sobre otra fue estudiada por Charles Coulomb (1736–1806) mediante una balanza de torsión de su propia invención.* En el experimento de Coulomb las esferas cargadas eran mucho menores que la distancia entre ellas, de modo que las cargas podían considerarse como puntuales. Coulomb utilizó el fenómeno de inducción para producir esferas igualmente cargadas y poder variar la carga depositada sobre ellas. Por ejemplo, comenzando con una carga q_0 sobre cada esfera, podía reducir la carga a $\frac{1}{2}q_0$ conectando a tierra una de las esferas temporalmente para descargarla, tras lo cual la desconectaba de tierra y ponía las dos esferas en contacto. Los resultados de los experimentos de Coulomb y otros científicos se resumen en la **ley de Coulomb**:

> La fuerza ejercida por una carga puntual sobre otra está dirigida a lo largo de la línea que las une. La fuerza varía inversamente con el cuadrado de la distancia que separa las cargas y es proporcional al producto de las mismas. Es repulsiva si las cargas tienen el mismo signo y atractiva si las cargas tienen signos opuestos.
>
> LEY DE COULOMB



Balanza de torsión de Coulomb. *(Bundy Library, Norwalk, CT.)*

* El aparato experimental de Coulomb era esencialmente el mismo que se describió en el experimento de Cavendish (capítulo 11), con las masas reemplazadas por pequeñas esferas cargadas. La atracción gravitatoria de las esferas es completamente despreciable comparada con la atracción o repulsión eléctrica producida por las cargas depositadas en las esferas por frotamiento.

El *módulo* de la fuerza eléctrica ejercida por una carga puntual q_1 sobre otra carga puntual q_2 a la distancia r viene dada por

$$F = \frac{k|q_1 q_2|}{r^2} \qquad 21.2$$

LEY DE COULOMB PARA LA FUERZA EJERCIDA POR q_1 SOBRE q_2

donde k es una constante positiva determinada experimentalmente conocida como **constante de Coulomb**, que tiene el valor

$$k = 8{,}99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \qquad 21.3$$

Si q_1 se encuentra en la posición $\vec{r}_1$ y q_2 en $\vec{r}_2$ (figura 21.6), la fuerza $\vec{F}_{12}$ ejercida por q_1 sobre q_2 es

$$\vec{F}_{12} = \frac{kq_1 q_2}{r_{12}^2}\hat{r}_{12} \qquad 21.4$$

LEY DE COULOMB (FORMA VECTORIAL)

donde $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ es el vector que apunta de q_1 a q_2, y $\hat{r}_{12} = \vec{r}_{12}/r_{12}$ es un vector unitario que apunta de q_1 a q_2.

De acuerdo con la tercera ley de Newton, la fuerza $\vec{F}_{21}$ ejercida por q_2 sobre q_1 es de sentido contrario a la fuerza $\vec{F}_{12}$. Obsérvese la semejanza entre la ley de Coulomb y la ley de Newton de la gravedad (ecuación 11.3). Ambas son leyes que dependen de la inversa del cuadrado de la distancia. Sin embargo, la fuerza gravitatoria entre dos partículas es proporcional a las masas de las partículas y es siempre atractiva, mientras que la fuerza eléctrica es proporcional a las cargas de las partículas y es repulsiva si ambas cargas tienen el mismo signo y atractiva si tienen signos contrarios.

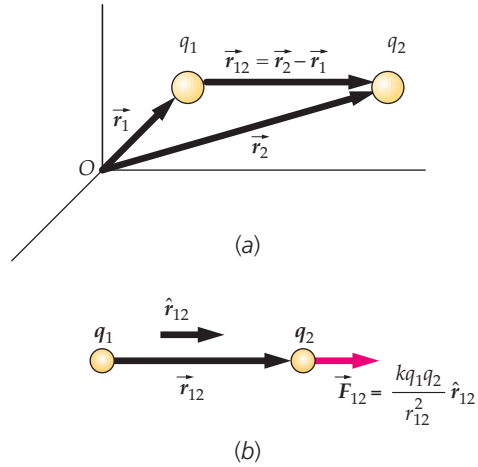


FIGURA 21.6 (*a*) Carga q_1 en la posición $\vec{r}_1$ y carga q_2 en $\vec{r}_2$, ambas respecto al origen O. La fuerza ejercida por q_1 sobre q_2 está en la dirección y sentido del vector $\vec{r}_{12} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$ si ambas cargas tienen el mismo signo, y en sentido opuesto si sus signos son contrarios. El vector unitario $\hat{r}_{12} = \vec{r}_{12}/r_{12}$ tiene la dirección del vector que une la carga q_1 con la q_2.

! La ecuación 21.4 da la dirección correcta para la fuerza en los casos en que ambas cargas sean positivas, negativas o de diferente signo.

Ejemplo 21.2 Fuerza eléctrica en un átomo de hidrógeno

En el átomo de hidrógeno, el electrón está separado del protón por una distancia media de aproximadamente $5{,}3 \times 10^{-11}$ m. ¿Cuál es el módulo de la fuerza electrostática ejercida por el protón sobre el electrón?

PLANTEAMIENTO Asígnese la carga q_1 al protón y q_2 al electrón. Se utiliza la ley de Coulomb para determinar el módulo de la fuerza de atracción electrostática entre el protón y el electrón.

SOLUCIÓN

1. Se dibuja el electrón y el protón colocándolos en el dibujo con sendos símbolos diferenciados (figura 21.7):

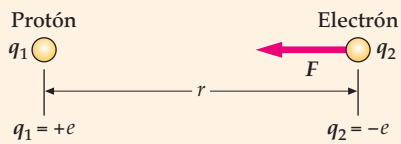


FIGURA 21.7

2. Usar la ecuación 21.2 (ley de Coulomb) para calcular la fuerza electrostática:

$$F = \frac{k|q_1 q_2|}{r^2} = \frac{ke^2}{r^2} = \frac{(8{,}99 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1{,}60 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{(5{,}3 \times 10^{-11} \text{ m})^2}$$

$$= \boxed{8{,}2 \times 10^{-8} \text{ N}}$$

COMPROBACIÓN El orden de magnitud está dentro de lo esperado. Las potencias de diez en el numerador combinadas son $10^9 \times 10^{-38} = 10^{-29}$, la potencia de diez en el denominador es 10^{-22}, y $10^{-29}/10^{-22} = 10^{-7}$. Comparando con el resultado, se tiene que $8{,}2 \times 10^{-8} \approx 10^{-7}$.

OBSERVACIÓN Comparada con las interacciones macroscópicas, esta fuerza es muy pequeña. Sin embargo, como la masa del electrón es tan pequeña, aproximadamente 10^{-30} kg, esta fuerza produce una aceleración enorme, $F/m \approx 9 \times 10^{22}$ m/s^2. La masa del protón es casi 2000 veces mayor que la del electrón, así que la aceleración del protón es alrededor de 4×10^{19} m/s^2. Compárese esta aceleración con la debida a la gravedad, $g = 10$ m/s^2.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.3 Dos cargas puntuales de 0,0500 μC cada una se colocan separadas por una distancia de 10 cm. Calcular el módulo de la fuerza ejercida por una de las cargas sobre la otra.

Puesto que tanto la fuerza eléctrica como la fuerza gravitatoria entre dos partículas varían en razón inversa con el cuadrado de su separación, la relación entre estas dos fuerzas es independiente de la distancia que separa las partículas. Podemos, pues, comparar las intensidades relativas de estas dos fuerzas en partículas elementales, tales como el electrón y el protón.

Ejemplo 21.3 Comparación cuantitativa entre las fuerzas eléctrica y gravitatoria

Calcular la relación que existe entre la fuerza eléctrica y la fuerza gravitatoria ejercidas entre el protón y el electrón de un átomo de hidrógeno.

PLANTEAMIENTO Utilizamos la ley de Coulomb con $q_1 = e$ y $q_2 = -e$ para hallar la fuerza eléctrica. Y usamos la ley de la gravitación de Newton junto con la masa del protón, $m_p = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg, y la masa del electrón, $m_e = 9{,}11 \times 10^{-31}$ kg, para hallar la fuerza de la gravedad.

SOLUCIÓN

1. Expresar los módulos de la fuerza eléctrica F_e y la fuerza gravitatoria F_g en función de las cargas, masas, distancia de separación r y las constantes eléctrica y de gravitación:
$$F_e = \frac{ke^2}{r^2} \qquad F_g = \frac{Gm_p m_e}{r^2}$$

2. Determinar la relación de ambas fuerzas. Obsérvese que la distancia de separación r se anula:
$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{ke^2}{Gm_p m_e}$$

3. Sustituir por los valores numéricos:
$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2)(1{,}60 \times 10^{-19}\ \text{C})^2}{(6{,}67 \times 10^{-11}\ \text{N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2)(1{,}67 \times 10^{-27}\ \text{kg})(9{,}11 \times 10^{-31}\ \text{kg})}$$
$$= \boxed{2{,}27 \times 10^{39}}$$

COMPROBACIÓN En el paso 3, las unidades eléctricas se cancelan en el numerador de la fracción. En el denominador se cancelan las unidades de masa. En consecuencia, tanto en el numerador como en el denominador, las unidades son N · m^2. Por lo tanto, la fracción no tiene dimensiones, como era de esperar, ya que es una relación entre dos fuerzas.

OBSERVACIÓN Este resultado demuestra por qué los efectos de la gravedad no se consideran al tratar las interacciones atómicas o moleculares.

Aunque la fuerza gravitatoria es increíblemente pequeña comparada con la fuerza eléctrica y prácticamente no desempeña papel alguno a nivel atómico, la gravedad es la fuerza dominante entre sistemas grandes, como planetas y estrellas, porque estos objetos poseen un número casi igual de cargas positivas y negativas y, por lo tanto, se neutralizan las fuerzas eléctricas atractivas y repulsivas. La fuerza neta entre objetos astronómicos es esencialmente la fuerza de atracción gravitatoria.

FUERZA EJERCIDA POR UN SISTEMA DE CARGAS

En un sistema de cargas, cada una de ellas ejerce una fuerza dada por la ecuación 21.4 sobre cada una de las restantes. Así, la fuerza neta sobre cada carga es la suma vectorial de las fuerzas individuales ejercidas sobre dicha carga por las restantes cargas del sistema. Esta es una consecuencia del *principio de superposición* de las fuerzas.

Véase el **Apéndice de matemáticas** *para más información sobre* **Trigonometría**

Ejemplo 21.4 Fuerza neta

Tres cargas puntuales se encuentran sobre el eje x; q_1 está en el origen, q_2 en $x = 2$ m y q_0 en x ($x > 2$ m). (*a*) Determinar la fuerza neta sobre q_0 ejercida por q_1 y q_2 si $q_1 = +25$ nC, $q_2 = -10$ nC, $q_0 = +20$ nC y $x = 3{,}5$ m. (*b*) Obtener una expresión de la fuerza neta sobre q_0 debida a q_1 y q_2 en el intervalo 2 m $< x < \infty$.

PLANTEAMIENTO La fuerza neta sobre q_0 es el vector suma de la fuerza $\vec{F}_{10}$ ejercida por q_1 y la fuerza $\vec{F}_{20}$ ejercida por q_2. Las fuerzas individuales se determinan mediante la ley de Coulomb. Obsérvese que $\hat{r}_{10} = \hat{r}_{20} = \hat{i}$ pues $\hat{r}_{10}$ y $\hat{r}_{20}$ se encuentran ambos en la dirección positiva de x.

SOLUCIÓN

(*a*) 1. Dibujar un croquis del sistema de cargas (figura 21.8*a*). Indicar las distancias r_{10} y r_{20}:

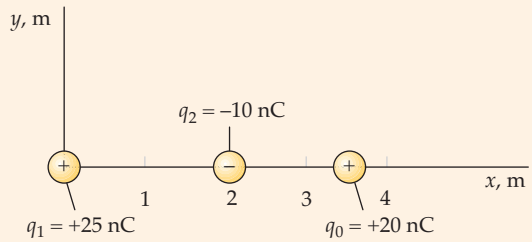


FIGURA 21.8*a*

2. Hallar la fuerza ejercida por la carga q_1 sobre la q_0. Estas cargas se repelen por ser del mismo signo. La fuerza tiene la dirección del eje x:

$$F_{10} = \frac{k|q_1 q_0|}{r_{10}^2}$$

$$\vec{F}_{10} = +F_{10}\hat{i} = +\frac{k|q_1 q_0|}{r_{10}^2}\hat{i} = \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(25 \times 10^{-9}\ \text{C})(20 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(3{,}5\ \text{m})^2}\hat{i}$$

$$= (0{,}37 \times 10^{-6}\ \text{N})\hat{i}$$

3. Hallar la fuerza ejercida por la carga q_2 sobre la q_0. Estas cargas se atraen por ser de diferente signo. La fuerza tiene la dirección del eje $-x$:

$$F_{20} = \frac{k|q_2 q_0|}{r_{20}^2}$$

$$\vec{F}_{20} = -F_{20}\hat{i} = -\frac{k|q_2 q_0|}{r_{20}^2}\hat{i} = -\frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(10 \times 10^{-9}\ \text{C})(20 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(1{,}5\ \text{m})^2}\hat{i}$$

$$= -(0{,}80 \times 10^{-6}\ \text{N})\hat{i}$$

4. Sumar los resultados para obtener la fuerza neta:

$$\vec{F}_{\text{neta}} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} = \boxed{-(0{,}43 \times 10^{-6}\ \text{N})\hat{i}}$$

(*b*) 1. Dibujar la configuración geométrica de las cargas, definiendo las distancias r_{10} y r_{20} (figura 21.8*b*):

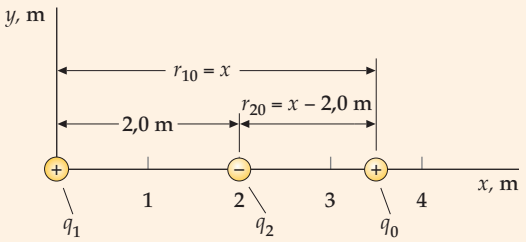


FIGURA 21.8*b*

2. Obtener una expresión para la fuerza debida a la carga q_1: $\vec{F}_{10} = \dfrac{k|q_1 q_0|}{x^2}\hat{i}$

3. Obtener una expresión para la fuerza debida a la carga q_2: $\vec{F}_{20} = -\dfrac{k|q_2 q_0|}{(x - 2{,}0\text{ m})^2}\hat{i}$

4. Sumar los dos vectores resultantes obtenidos en 2 y 3, para obtener la fuerza neta: $\vec{F}_{\text{neta}} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20} = \left(\dfrac{k|q_1 q_0|}{x^2} - \dfrac{k|q_2 q_0|}{(x - 2{,}0\text{ m})^2}\right)\hat{i}$

COMPROBACIÓN En los pasos 2, 3 y 4 de la parte (*b*), ambas fuerzas tienden a cero cuando x tiende a infinito, como era de esperar. Además, tal como estaba previsto, el módulo de la fuerza en el paso 3 tiende a infinito cuando x tiende a 2,0 m.

OBSERVACIÓN La carga q_2 está localizada entre la q_1 y q_0, lo cual podría inducir a pensar que la presencia de q_2 podría afectar a la fuerza $\vec{F}_{10}$ que ejerce la q_1 sobre la q_0. Sin embargo, esto no es así, ya que la presencia de q_2 no tiene influencia en la fuerza que ejerce la q_1 sobre la q_0. (Este hecho se denomina principio de superposición.) La figura 21.9 muestra la componente x de la fuerza F_x sobre q_0 como una función de su posición x en la región $2\text{ m} < x < \infty$. Cerca de q_2 domina la fuerza debida a q_2, y como las cargas opuestas se atraen, la fuerza sobre q_0 está dirigida hacia el sentido negativo de las x. Para $x >> 2$ m, la fuerza está dirigida en el sentido positivo de las x porque la distancia entre q_1 y q_2 es despreciable, de modo que la fuerza debida a las dos cargas es casi la misma que si hubiese una única carga de +15 nC.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.4 Si q_0 se encuentra en $x = 1$ m, determinar la fuerza neta que actúa sobre q_0.

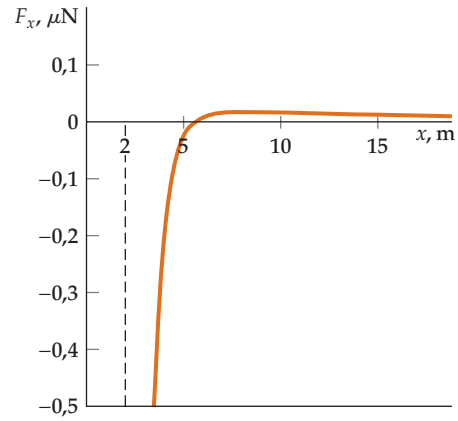


FIGURA 21.9

Para que un sistema de cargas permanezca estacionario, deben existir otras fuerzas no eléctricas actuando sobre las cargas, de modo que la fuerza resultante de todas las fuerzas que actúan sobre cada carga sea cero. En el ejemplo anterior y en los siguientes, supondremos la existencia de tales fuerzas, de modo que todas las cargas permanecen estacionarias.

Ejemplo 21.5 Fuerza neta en dos dimensiones

La carga $q_1 = +25$ nC está en el origen, la carga $q_2 = -15$ nC está sobre el eje x en $x = 2$ m, y la carga $q_0 = +20$ nC está en el punto $x = 2$ m, $y = 2$ m, como se indica en la figura 21.10. Determinar el vector de la fuerza resultante sobre q_0.

PLANTEAMIENTO La fuerza resultante es la suma vectorial de las fuerzas individuales ejercidas por cada una de las cargas sobre q_0. Calcularemos cada una de las fuerzas a partir de la ley de Coulomb y la escribiremos en función de sus componentes rectangulares.

SOLUCIÓN

1. Dibujar las posiciones de las tres cargas en un sistema de ejes coordenados. Mostrar la fuerza resultante $\vec{F}$ sobre la carga q_0 como suma vectorial de las fuerzas $\vec{F}_{10}$ debida a q_1 y $\vec{F}_{20}$ debida a q_2 (figura 21.10*a*):

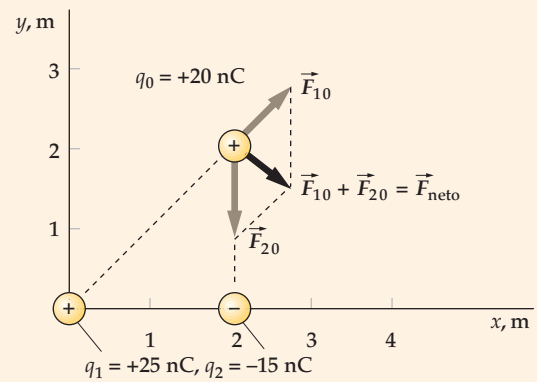


FIGURA 21.10*a*

2. La fuerza resultante $\vec{F}$ sobre q_0 es la suma de las fuerzas individuales:

$$\vec{F} = \vec{F}_{10} + \vec{F}_{20}$$
así $\Sigma F_x = F_{10x} + F_{20x}$ y $\Sigma F_y = F_{10y} + F_{20y}$

3. La fuerza $\vec{F}_{10}$ está dirigida a lo largo de la línea dirigida de q_1 a q_0. Utilizar $r_{10} = 2{,}0\sqrt{2}$ m como distancia entre q_1 y q_0, para calcular el módulo de la fuerza:

$$F_{10} = \frac{k|q_1 q_0|}{r_{10}^2} = \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(25 \times 10^{-9}\ \text{C})(20 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(2{,}0\sqrt{2}\ \text{m})^2}$$
$$= 5{,}62 \times 10^{-7}\ \text{N}$$

4. Como $\vec{F}_{10}$ forma un ángulo de 45° con los ejes x e y, sus componentes x e y son iguales entre sí:

$$F_{10x} = F_{10y} = F_{10} \cos 45° = (5{,}62 \times 10^{-7}\text{N}) \cos 45°$$
$$= 3{,}97 \times 10^{-7}\ \text{N}$$

5. La fuerza $\vec{F}_{20}$ ejercida por q_2 sobre q_0 es atractiva en la dirección $-y$, como se muestra en la figura 21.10*a*:

$$\vec{F}_{20} = -\frac{k|q_2 q_0|}{r_{20}^2}\hat{j} = -\frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(15 \times 10^{-9}\ \text{C})(20 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(2{,}0\ \text{m})^2}\hat{j}$$
$$= -(6{,}74 \times 10^{-7}\text{N})\hat{j}$$

6. Calcular las componentes de la fuerza resultante:

$$F_x = F_{10x} + F_{20x} = (3{,}97 \times 10^{-7}\ \text{N}) + 0 = 3{,}97 \times 10^{-7}\ \text{N}$$
$$F_y = F_{10y} + F_{20y} = (3{,}97 \times 10^{-7}\ \text{N}) + (-6{,}74 \times 10^{-7}\ \text{N})$$
$$F_y = -2{,}77 \times 10^{-7}\ \text{N}$$

7. Dibujar la fuerza resultante (figura 21.10*b*) y sus dos componentes:

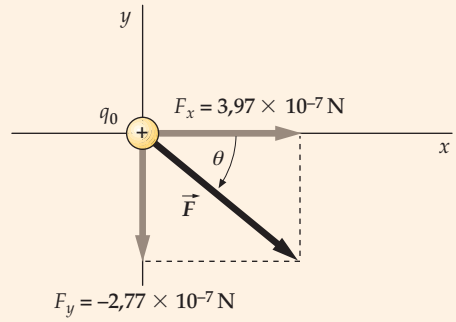


FIGURA 21.10*b*

8. El módulo de la fuerza resultante se determina a partir de sus componentes:

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{(3{,}97 \times 10^{-7}\ \text{N})^2 + (-2{,}77 \times 10^{-7}\ \text{N})^2}$$
$$= 4{,}84 \times 10^{-7}\ \text{N} = \boxed{4{,}8 \times 10^{-7}\ \text{N}}$$

9. La fuerza resultante apunta hacia la derecha y hacia abajo, como se muestra en la figura 21.10*b*, formando con el eje x un ángulo θ dado por:

$$\text{tg}\,\theta = \frac{F_y}{F_x} = \frac{-2{,}77}{3{,}97} = -0{,}698$$
$$\theta = \text{arctg}\,(-0{,}698) = -34{,}9° = \boxed{-35°}$$

COMPROBACIÓN Comparando los resultados de los pasos 3 y 5, podemos constatar que los módulos de estas dos fuerzas son relativamente parecidos aunque $|q_1|$ es algo mayor que $|q_2|$, ya que la diferencia entre el valor de q_2 y q_0 es menor que la existente entre q_1 y q_0.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.5 Expresar $\hat{r}_{10}$ del ejemplo 21.5 en combinación lineal de los vectores unitarios $\hat{i}$ y $\hat{j}$.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.6 En el ejemplo 21.5, donde x_{10} es la componente de $\hat{r}_{10}$, ¿la componente x de la fuerza $\vec{F}_{10} = (kq_1q_0/r_{10}^2)\hat{r}_{10}$ es igual a kq_1q_0/x_{10}^2?

21.4 EL CAMPO ELÉCTRICO

La fuerza eléctrica ejercida por una carga sobre otra es un ejemplo de acción a distancia, semejante a la fuerza gravitatoria ejercida por una masa sobre otra. La idea de acción a distancia presenta un problema conceptual difícil. ¿Cuál es el mecanismo según el cual una partícula puede ejercer una fuerza sobre otra a través del espacio

vacío que existe entre las partículas? Supongamos que una partícula cargada situada en un punto determinado se mueve súbitamente. ¿Variaría instantáneamente la fuerza ejercida sobre otra partícula situada a la distancia r de la primera? Para evitar el problema de la acción a distancia se introduce el concepto de **campo eléctrico**. Una carga crea un campo eléctrico $\vec{E}$ en todo el espacio y este campo ejerce una fuerza sobre la otra carga. La fuerza es así ejercida por el campo $\vec{E}$ existente en la posición de la segunda carga, más que por la propia primera carga que se encuentra a cierta distancia. Los cambios del campo se propagan a través del espacio con la velocidad de la luz, c. Así, si una carga se mueve súbitamente, la fuerza que ejerce sobre otra carga a la distancia r no se modifica hasta que transcurre el tiempo r/c.

La figura 21.11*a* muestra una serie de cargas puntuales, q_1, q_2 y q_3, dispuestas arbitrariamente en el espacio. Estas cargas producen un campo eléctrico $\vec{E}$ en cualquier punto del espacio. Si situamos una pequeña carga testigo q_0 en algún punto próximo, ésta experimentará la acción de una fuerza debido a las otras cargas. La fuerza resultante ejercida sobre q_0 es la suma vectorial de las fuerzas individuales ejercidas sobre q_0 por cada una de las otras cargas del sistema. Como cada una de estas fuerzas es proporcional a q_0, la fuerza neta será proporcional a q_0. El campo eléctrico $\vec{E}$ en un punto se define por esta fuerza dividida por q_0:*

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \qquad (q_0 \text{ pequeña}) \qquad 21.5$$

DEFINICIÓN: CAMPO ELÉCTRICO

La unidad del SI del campo eléctrico es el newton por coulomb (N/C). Además, la carga testigo q_0 ejercerá una fuerza sobre cada una de las otras cargas (figura 21.1*b*), produciéndoles movimiento; por ello, se debe considerar la carga q_0 tan pequeña como para que las fuerzas ejercidas sobre las otras cargas sean despreciables. De esta forma, el campo eléctrico en el lugar donde se coloca la carga q_0 se define mediante la ecuación 21.5 en el límite en el que la carga q_0 tiende a cero. En la tabla 21.2 se presentan las magnitudes de algunos de los campos eléctricos que encontramos en la naturaleza.

El campo eléctrico es un vector que describe la condición en el espacio creada por el sistema de cargas puntuales. Desplazando la carga testigo q_0 de un punto a otro, podemos determinar $\vec{E}$ en todos los puntos del espacio (excepto el ocupado por una carga q). El campo eléctrico $\vec{E}$ es, por lo tanto, una función vectorial de la posición. La fuerza ejercida sobre una carga testigo q_0 en cualquier punto está relacionada con el campo eléctrico en dicho punto por

$$\vec{F} = q_0\vec{E} \qquad 21.6$$

PROBLEMA PRÁCTICO 21.7

Cuando se coloca una carga testigo de 5 nC en un punto determinado, sufre la acción de una fuerza de 2×10^{-4} N en la dirección creciente de x. ¿Cuál es el campo eléctrico $\vec{E}$ en dicho punto?

PROBLEMA PRÁCTICO 21.8

¿Cuál es la fuerza que actúa sobre un electrón situado en el punto donde el campo eléctrico es $\vec{E} = (4{,}0 \times 10^4 \text{ N/C})\hat{i}$?

El campo eléctrico debido a una sola carga puntual q_i en la posición r_i puede calcularse a partir de la ley de Coulomb. Si situamos una pequeña carga testigo positiva q_0 en algún punto P a la distancia r_{iP} de la carga q_i, la fuerza que actúa sobre ella es

$$\vec{F}_{i0} = \frac{kq_iq_0}{r_{iP}^2}\hat{r}_{iP}$$

* Esta definición es semejante a la del campo gravitatorio terrestre, formulada en la sección 4.3 como la fuerza por unidad de masa ejercida por la Tierra sobre un cuerpo.

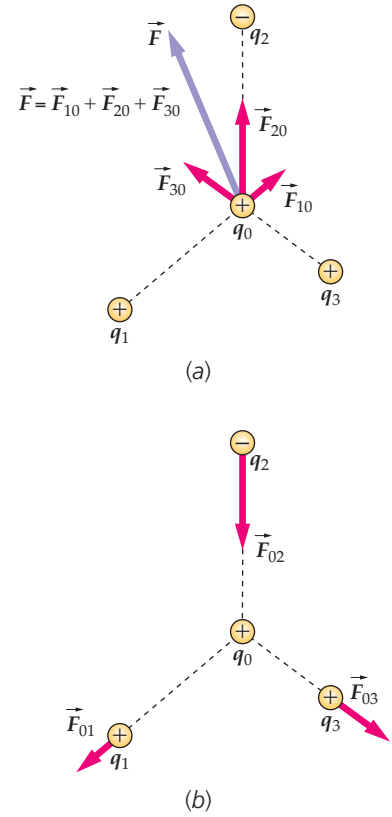


FIGURA 21.11 (*a*) Una pequeña carga testigo (o de prueba) q_0 en las proximidades de un sistema de cargas q_1, q_2, q_3,... experimenta una fuerza $\vec{F}$ proporcional a q_0. La relación $\vec{F}/q_0$ es el campo eléctrico en esa posición. (*b*) La carga testigo q_0 ejerce también una fuerza sobre cada una de las otras cargas que le rodean y cada una de estas fuerzas es proporcional a q_0.

Tabla 21.2 Algunos campos eléctricos de la naturaleza

	E, N/C
En los cables domésticos	10^{-2}
En las ondas de la radio	10^{-1}
En la atmósfera	10^{2}
En la luz solar	10^{3}
Bajo una nube tormentosa	10^{4}
En la descarga de un relámpago	10^{4}
En un tubo de rayos X	10^{6}
En el electrón de un átomo de hidrógeno	5×10^{11}
En la superficie de un núcleo de uranio	2×10^{21}

El campo eléctrico en el punto P debido a la carga q_i (figura 21.12) es, por lo tanto,

$$\vec{E}_{iP} = \frac{kq_i}{r_{iP}^2}\hat{\mathbf{r}}_{iP} \qquad 21.7$$

LEY DE COULOMB PARA EL CAMPO $\vec{E}$

donde $\hat{r}_{iP}$ es un vector unitario que apunta desde el **punto fuente** i al punto de observación del campo o **punto campo** P.

El campo eléctrico resultante debido a una distribución de cargas puntuales se determina sumando los campos originados por cada carga separadamente:

$$\vec{E}_P = \sum_i \vec{E}_{iP} \qquad 21.8$$

CAMPO ELÉCTRICO $\vec{E}$ DEBIDO A UN SISTEMA DE CARGAS PUNTUALES

Esto implica que el campo eléctrico satisface el principio de superposición.

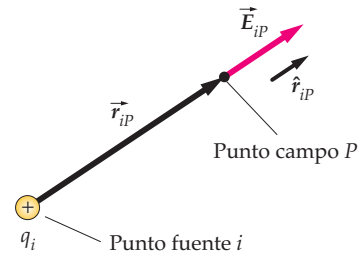


FIGURA 21.12 El campo eléctrico $\vec{E}$ en un punto P debido a la carga q_i colocada en un punto i.

¡ Aunque la expresión del campo eléctrico (ecuación 21.7) depende de la localización del punto P, el campo no depende, sin embargo, de la carga testigo q_0; por ello, su valor no aparece en la ecuación 21.7.

ESTRATEGIA DE RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Cálculo del campo eléctrico resultante

PLANTEAMIENTO Para calcular el campo eléctrico resultante $\vec{E}_P$ en un punto P generado por una distribución de cargas puntuales, se debe dibujar, en primer lugar, la configuración de las cargas. En el esquema hay que incluir los ejes de coordenadas y un punto arbitrario donde se desea calcular el campo.

SOLUCIÓN

1. Definir r_{iP} como el vector que tiene su origen en cualquier carga i y su final en el punto P, y $\vec{E}_{iP}$ como el vector del campo eléctrico generado por la carga i en el punto P.
2. Si el punto P y todas las cargas puntuales no están alineados, se deben fijar los ángulos que cada vector $\vec{E}_{iP}$ forma con los tres ejes.
3. Determinar las tres componentes de cada vector campo $\vec{E}_{iP}$ en los ejes y calcular las componentes del campo eléctrico resultante $\vec{E}_P$.

Ejemplo 21.6 Dirección del campo eléctrico — *Conceptual*

Se coloca una carga positiva $q_1 = +q$ en un punto del eje $x = a$, y otra $q_2 = -2q$ en $x = -a$, tal como muestra la figura 21.13. Dividimos el eje x en tres intervalos: región I ($x < -a$), región II ($-a < x < a$) y región III ($x > a$) ¿Existe algún punto en estas regiones donde el campo eléctrico sea igual a cero? ¿En qué regiones?

PLANTEAMIENTO Sean $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ los campos eléctricos generados por q_1 y q_2, respectivamente. Como q_1 es positiva, $\vec{E}_1$ apuntará en el sentido de alejamiento de la carga y, como q_2 es negativa, $\vec{E}_2$ apuntará hacia la correspondiente carga q_2. El campo eléctrico resultante $\vec{E}$ es la suma vectorial de ambos campos ($\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$). Por lo tanto, es igual a cero si los campos de cada una de las cargas son iguales en módulo y tienen sentidos opuestos. Por otro lado, según nos vamos aproximando a dichas cargas, sus respectivos campos tienden a infinito. Además, en puntos muy alejados de ambas cargas, siempre sobre el eje x, el campo resultante se aproxima al ejercido por la carga suma de ambas, $q_1 + q_2$, localizada en el punto medio de ambas cargas, siendo un campo debido a una carga negativa, puesto que $q_1 + q_2$ tiene carga resultante negativa.

SOLUCIÓN

1. En la figura 21.13 se representa la configuración de cargas del problema, mostrando las dos cargas sobre el eje x, y el campo eléctrico, dibujado en forma esquemática, debido a cada una de las cargas en cada una de las regiones I, II y III, denominando los respectivos puntos campo arbitrarios de estas regiones como P_I, P_{II} y P_{III}.

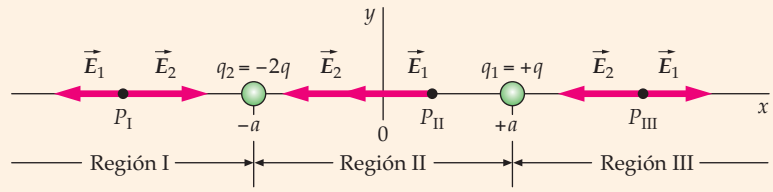


FIGURA 21.13

2. Analizar en qué puntos, de la región I, los campos son iguales en módulo y tienen sentidos opuestos:

En todos los puntos de la región I, los dos campos eléctricos tienen sentidos opuestos, y el módulo E_2 es mayor que E_1 por dos razones: porque cualquier punto de la región I está más cerca de q_2 que de q_1 y, además, el valor absoluto de q_2 es doble que el de q_1. En consecuencia, en esta región el campo eléctrico resultante no es cero en ninguno de sus puntos.

3. Analizar en qué puntos, de la región II, los campos son iguales en módulo y tienen sentidos opuestos:

En la región II, los dos campos tienen el mismo sentido y, por lo tanto, en ningún punto se puede anular la suma de ambos vectores.

4. Analizar en qué puntos, de la región III, los campos son iguales en módulo y tienen sentidos opuestos:

En la región III, los dos campos tiene sentidos opuestos y, en puntos cercanos a $x = a$, E_1 es mayor que E_2 porque en estos puntos próximos a q_1, E_1 tiende a infinito. Por el contrario, en puntos alejados, donde $x >> a$, E_2 es mayor que E_1 porque a grandes distancias de las dos cargas, el sentido del campo viene determinado por el que crea la carga suma de ambas $q_1 + q_2$. Por consiguiente, habrá algún punto de dicha región en donde el campo resultante es igual a cero, puesto que el módulo de E_1 será en él igual al de E_2 y sus sentidos serán opuestos, por lo que se anularán.

COMPROBACIÓN El campo eléctrico resultante se anula en un punto de la región III. Esta anulación se produce porque la carga q_2 es mayor en módulo, está más alejada de todos los puntos de esta región que la q_1, y porque las dos cargas son de signo contrario. El resultado coincide con lo esperado.

Ejemplo 21.7 Campo eléctrico debido a dos cargas positivas en la recta que las une

Una carga positiva $q_1 = +8$ nC está sobre el eje x en $x = x_1 = -1{,}0$ m y una segunda carga positiva $q_2 = +12$ nC está sobre el eje x en $x = x_2 = 3{,}0$ m. Determinar el campo eléctrico resultante (*a*) en el punto A sobre el eje x en $x = 6$ m y (*b*) en el punto B sobre el eje x en $x = 2$ m.

PLANTEAMIENTO Sean $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ los campos creados por q_1 y q_2, respectivamente. El sentido del campo $\vec{E}_1$ se aleja de q_1 y el sentido del campo $\vec{E}_2$ se aleja de q_2, por ser ambas cargas positivas. El problema trata de determinar el campo resultante en todos los puntos del eje x, mediante la suma vectorial de $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$.

SOLUCIÓN

(*a*) 1. La configuración de las cargas viene dada en la figura 21.14. Se dibujan los campos debidos a cada una de las cargas en los puntos A y B:

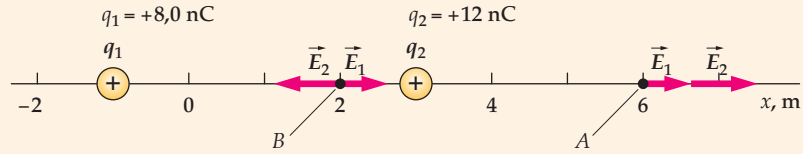


FIGURA 21.14 Como q_1 y q_2 son cargas positivas, $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ apuntan en el sentido de alejamiento de las respectivas cargas tanto en A como en B.

2. Calcular $\vec{E}$ en el punto A, utilizando $r_{1A} = |x_A - x_1| = 6{,}0\text{ m} - (-1{,}0\text{ m}) = 7{,}0\text{ m}$ y $r_{2A} = |x_A - x_2| = 6{,}0\text{ m} - (3{,}0\text{ m}) = 3{,}0\text{ m}$:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{kq_1}{r_{1A}^2}\hat{r}_{1A} + \frac{kq_2}{r_{2A}^2}\hat{r}_{2A} = \frac{kq_1}{(x_A - x_1)^2}\hat{i} + \frac{kq_2}{(x_A - x_2)^2}\hat{i}$$

$$= \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(8{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(7{,}0\ \text{m})^2}\hat{i} + \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(12 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(3{,}0\ \text{m})^2}\hat{i}$$

$$= (1{,}47\ \text{N/C})\hat{i} + (12{,}0\ \text{N/C})\hat{i} = \boxed{(13\ \text{N/C})\hat{i}}$$

(*b*) Calcular $\vec{E}$ en el punto *B*, donde $r_{1B} = |x_B - x_1| = 2{,}0\text{ m} - (-1{,}0\text{ m}) = 3{,}0\text{ m}$ y $r_{2B} = |x_B - x_2| = |2{,}0\text{ m} - (3{,}0\text{ m})| = 1{,}0\text{ m}$:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 = \frac{kq_1}{r_{1B}^2}\hat{r}_{1B} + \frac{kq_2}{r_{2B}^2}\hat{r}_{2B} = \frac{kq_1}{(x_B - x_1)^2}\hat{i} + \frac{kq_2}{(x_B - x_2)^2}(-\hat{i})$$

$$= \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(8{,}0 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(3{,}0\ \text{m})^2}\hat{i} - \frac{(8{,}99 \times 10^9\ \text{N}\cdot\text{m}^2/\text{C}^2)(12 \times 10^{-9}\ \text{C})}{(1{,}0\ \text{m})^2}\hat{i}$$

$$= (7{,}99\ \text{N/C})\hat{i} - (108\ \text{N/C})\hat{i} = \boxed{-(100\ \text{N/C})\hat{i}}$$

COMPROBACIÓN El campo en la parte (*b*) es grande en la dirección de las *x* negativas. Esto es así porque el punto *B* está más cercano de la carga q_2 que de la q_1, siendo q_2 (12 nC) la mayor de las dos.

OBSERVACIÓN El campo eléctrico $\vec{E}_1$ predomina en el campo resultante en los puntos cercanos a $q_1 = 8$ nC. Existe un punto entre q_1 y q_2 en el que el campo total es cero. Una carga testigo puesta en ese punto no experimentaría fuerza alguna. En la figura 21.15, se representa E_x, que es el módulo de campo resultante en el eje *x*, en función de esta coordenada.

PROBLEMA PRÁCTICO 21.9 A partir de los datos del ejemplo 21.7, localizar el punto del eje *x* donde el campo eléctrico es igual a cero.

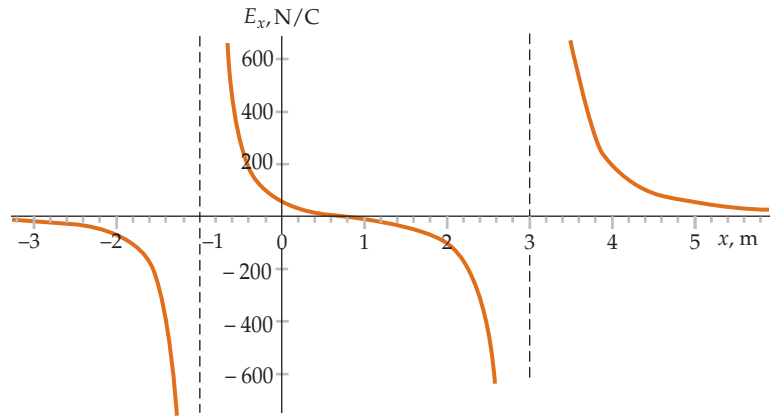


FIGURA 21.15

Ejemplo 21.8 Campo eléctrico en puntos del eje *y* debido a cargas puntuales colocadas en el eje *x*

Inténtelo usted mismo

Una carga puntual $q_1 = +8{,}0$ nC está situada en el origen y una segunda carga $q_2 = +12{,}0$ nC en $x = 4{,}0$ m. Determinar el campo eléctrico en $y = 3{,}0$ m.

PLANTEAMIENTO Como en el ejemplo 21.7, $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2$. El campo eléctrico $\vec{E}_1$ en puntos del eje *y* debido a la carga q_1 tiene la propia dirección de dicho eje, y el $\vec{E}_2$ debido a q_2 se encuentra en el segundo cuadrante del plano. Para determinar el vector campo $\vec{E}$, lo haremos calculando primero por separado sus componentes *x* e *y*.

SOLUCIÓN

Tape la columna de la derecha e intente resolverlo usted mismo.

Pasos

1. En la figura 21.16*a*, están colocadas las cargas en el sistema de coordenadas y se propone un punto arbitrario del eje donde se dibuja el campo debido a cada una de las cargas; se indican las distancias y ángulos de forma apropiada.

Respuestas

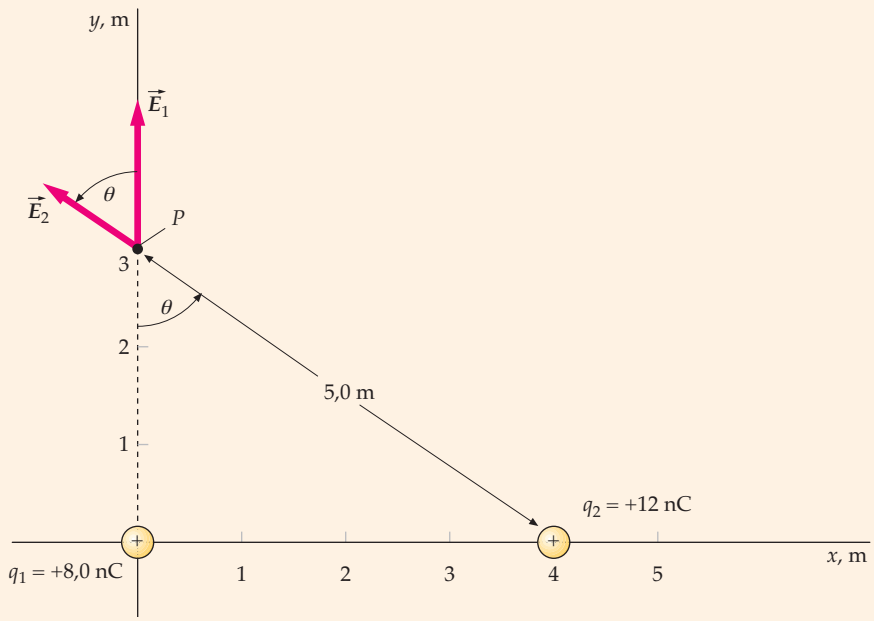


FIGURA 21.16*a*

2. Calcular el módulo del campo $\vec{E}_1$ debido a q_1 en el punto (0, 3,0 m). Hallar las componentes sobre los ejes x e y de este campo.

$$E_1 = kq_1/y^2 = 7{,}99 \text{ N/C}$$
$$E_{1x} = 0,\ E_{1y} = E_1 = 7{,}99 \text{ N/C}$$

3. Calcular el módulo del campo $\vec{E}_2$ debido a q_2.

$$E_2 = 4{,}32 \text{ N/C}$$

4. Expresar las componentes x e y de $\vec{E}_2$ en función del ángulo θ.

$$E_{2x} = -E_2 \operatorname{sen}\theta;\ E_{2y} = E_2 \cos\theta$$

5. Calcular sen θ y cos θ.

$$\operatorname{sen}\theta = 0{,}80;\ \cos\theta = 0{,}60$$

6. Calcular E_{2x} y E_{2y}.

$$E_{2x} = -3{,}46 \text{ N/C};\ E_{2y} = 2{,}59 \text{ N/C}$$

7. En la figura 21.16*b*, se dibujan las componentes del campo resultante, incluyendo el vector $\vec{E}$ y el ángulo que forma este vector con el eje x.

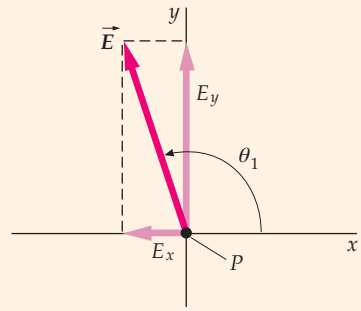


FIGURA 21.16*b*

8. Determinar las componentes x e y del campo resultante $\vec{E}$.

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = -3{,}46 \text{ N/C}$$
$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 10{,}6 \text{ N/C}$$

9. Calcular el módulo de $\vec{E}$ a partir de sus componentes.

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = 11{,}2 \text{ N/C} = \boxed{11 \text{ N/C}}$$

10. Determinar el ángulo θ_1 formado por $\vec{E}$ con el eje x.

$$\theta_1 = \operatorname{arctg}\left(\frac{E_y}{E_x}\right) = \boxed{108°}$$

COMPROBACIÓN Tal como era de esperar, el módulo de E es mayor que el de E_1 y el de E_2, pero menor que la suma de ambos. (Este resultado es lógico porque el ángulo entre $\vec{E}_1$ y $\vec{E}_2$ es diferente de cero.)

Ejemplo 21.9 Campo eléctrico debido a dos cargas del mismo módulo y signo contrario

Una carga $+q$ se encuentra en $x = a$ y una segunda carga $-q$ en $x = -a$ (figura 21.17). (*a*) Determinar el campo eléctrico sobre el eje x en un punto arbitrario $x > a$. (*b*) Determinar la forma límite del campo eléctrico para $x >> a$.

PLANTEAMIENTO Usando el principio de superposición, $\vec{E}_P = \vec{E}_{1P} + \vec{E}_{2P}$, calculamos el campo eléctrico en el punto P. Para $x > a$, el campo eléctrico $\vec{E}_+$ debido a la carga positiva tiene la dirección de las x positivas y el $\vec{E}_-$ debido a la carga negativa la de las x negativas. La distancia del punto P a la carga positiva es $x - a$, y a la carga negativa $x - (-a) = x + a$.

SOLUCIÓN

(*a*) 1. La figura 21.17 muestra la distribución de las cargas y sus respectivas distancias al punto en el que se mide el campo:

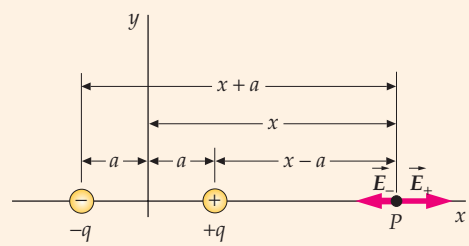


FIGURA 21.17